

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПЫЛЕНИЯ ПСЕВДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ  
МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ**

**БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М. А., СОСНОВСКИЙ А. В., СИВИЦКИЙ И. К.**

*(Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси;  
г. Минск, Республика Беларусь)*

**Введение.** Основным недостатком при использовании метода гиперзвуковой металлизации для нанесения псевдосплавных покрытий является неравномерность процесса распыления при использовании проволок разных диаметров, обладающих различными теплофизическими свойствами. Это приводит к образованию дефектных участков покрытия из капель разного размера и участков с меньшим содержанием более тугоплавкого материала [1–3]. Таким образом, целью работы являлось определение оптимальных диаметров проволочных материалов для стабилизации процесса нанесения псевдосплавных покрытий.

**Методика исследования.** При подключении проволоки из более тугоплавкого материала к положительному потенциалу сварочного источника, используемого в процессе гиперзвуковой металлизации, равномерность распыления резко возрастает и достигает своего максимума при некотором увеличении диаметра легкоплавкой проволоки относительно тугоплавкой. Вероятно, что это происходит потому, что с катода испускается поток электронов, который переносится на анод. В результате соударения электронов с ионами металла анода и происходит большее тепловыделение, чем на катоде [4].

Объектом исследования являлся газотермический процесс нанесения покрытий из разнородных материалов (псевдосплавы). Для исследования использовалась установка ГМ-4 и проволоки различных диаметров из стали 40Х13, бронзы БрАЖ 10-1,5, цинка Ц1 и алюминия АМг3. Сплошность и поверхностная пористость покрытий определяли на микроскопе «Polyvar» с использованием программного комплекса «Autoscan». Результаты исследований представлены в таблице 1.

В соответствии с экспериментальной методикой, проволока, обозначенная в таблице как «тугоплавкий материал», подключалась к анодному выводу сварочного источника ВДУ-506.

## Результаты исследования.

Таблица 1. – Используемые в исследовании материалы и результаты, полученные при гиперзвуковой металлизации

| №  | Материал тугопл. проволоки | Диаметр тугопл. проволоки, мм | Материал легкопл. проволоки | Диаметр легкопл. проволоки, мм | Результаты металлизации, качество покрытия  |
|----|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| 1  | 2                          | 3                             | 4                           | 5                              | 6                                           |
| 1  | сталь                      | 2,0                           | алюминий                    | 1,6                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 2  | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,4                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 3  | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,5                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 4  | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,0                            | Процесс не стабилен                         |
| 5  | -«-                        | 2,0                           | бронза                      | 2,0                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 6  | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,5                            | Процесс не стабилен                         |
| 7  | -«-                        | 1,8                           | -«-                         | 2,0                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 8  | -«-                        | 1,8                           | -«-                         | 2,2                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 9  | -«-                        | 2,0                           | цинк                        | 1,8                            | Процесс не стабилен                         |
| 10 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,0                            | Процесс не стабилен                         |
| 11 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,5                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 12 | -«-                        | 1,6                           | -«-                         | 1,8                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 13 | бронза                     | 2,0                           | алюминий                    | 1,6                            | Процесс не стабилен                         |
| 14 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 1,8                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 15 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,2                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 16 | -«-                        | 1,8                           | -«-                         | 2,5                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 17 | -«-                        | 2,0                           | цинк                        | 1,8                            | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 18 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,0                            | Процесс не стабилен                         |
| 19 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,2                            | Процесс не стабилен                         |
| 20 | -«-                        | 2,0                           | -«-                         | 2,5                            | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |

Окончание таблицы 1

| 1  | 2        | 3   | 4    | 5   | 6                                           |
|----|----------|-----|------|-----|---------------------------------------------|
| 21 | алюминий | 2,0 | цинк | 2,0 | Имеются дефектные участки покрытия          |
| 22 | -«-      | 2,0 | -«-  | 2,2 | Процесс стабилен, качество покрытий хорошее |
| 23 | -«-      | 2,0 | -«-  | 2,5 | Процесс не стабилен                         |
| 24 | -«-      | 1,8 | -«-  | 1,8 | Имеются дефектные участки покрытия          |

Анализ экспериментальных результатов выявил три характерные группы режимов напыления, различающихся качеством покрытий:

1. Нестабильные режимы (прерывистое нанесение: «плевки» металла, неравномерная структура покрытия, поверхностная пористость 3–10%, размеры пор 8–30 мкм);

2. Периодически прерывающиеся режимы (цикличность процесса 8–12 секунд), образование дефектных наплывов, размеры частиц 40–100 мкм);

3. Стабильные режимы (непрерывный процесс напыления, равномерное формирование покрытия, пористость  $\leq 3\%$ ).

Статистический анализ экспериментальных данных позволил установить корреляционную зависимость между диаметром используемых проволок и их температурой плавления, выраженную эмпирическим уравнением (1):

$$d_{\text{л}} = d_{\text{т}} (T_{\text{т}} / T_{\text{л}})^{0,25}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{т}}$  – диаметр более тугоплавкой проволоки, мм;

$T_{\text{т}}$  – температура плавления более тугоплавкой проволоки, °С;

$T_{\text{л}}$  – температура плавления более легкоплавкой проволоки, °С.

В результате проведенного исследования следует сделать вывод, что стабильность процесса нанесения псевдосплавных покрытий зависит от диаметра проволок, используемых в качестве присадочного материала. Оптимальные показатели стабильности процесса напыления достигаются при расчёте диаметра более легкоплавкой проволоки с помощью выражения (1).

**Заключение.** Экспериментально установлено, что стабильность процесса напыления при одновременном распылении проволок из разнородных материалов (сталь – цветные металлы) обеспечивается подключением тугоплавкой проволоки к аноду и превышением диаметра легкоплавкой проволоки над тугоплавкой. На основе анализа экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость

для расчета оптимального соотношения диаметров проволок с учетом температур их плавления, что позволяет стабилизировать процесс напыления методом гиперзвуковой металлизации.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ №Т26КИ-032 (2026-2028 г.).

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Особенности формирования и структура электрометаллизационных покрытий системы сталь-алюминий / А. Л. Борисова, Б. Г. Губенко, В. А. Костин и др. – Автомат, сварка. – 1990. – № 8. – 81 с.
2. Вигилянская, Н.В. Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий / Н.В. Вигилянская, Ю.С. Борисов, И.А. Демьянов. – Автоматическая сварка. – №1. – 2012. – 70 с.
3. Перспективные материалы и технологии: монография: в 2-х т. / под. ред. В.В. Клубовича. – Т.1. – Г.9.: Исследование процесса гиперзвуковой металлизации стальных износ- и коррозионностойких покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский, Д.И. Трусов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – 279 с.
4. Мотяхов М.Ф. Электродуговая сварка металлов. – М. : Высшая школа, 1975. – С. 6–7.