

## Список литературы

1. Журнал лесопромышленного комплекса Леспроминформ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lesprominform.ru/>. – Дата доступа: 09.10.2017 г.
2. Публикация материала для обучения Лекции.Орг [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lektsii.org/>. – Дата доступа: 09.10.2017 г.
3. Справочник компаний Беларуси [Электронный ресурс] –Режим доступа: <http://belorussia.su/>. – Дата доступа: 09.10.2017 г.

УДК 621.791:621.793

### ОЦЕНКА СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ХОЛОДНЫМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

<sup>1</sup>Ли Ваншен, <sup>1</sup>Ан Гуашен, <sup>1</sup>Фенг Ли, <sup>2</sup>Горанский Г.Г., <sup>2</sup>Ваганов В.В.

<sup>1</sup>Ланьчжоуский технический университет, г. Ланьчжоу, Китай

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

e-mail: georggoran@rambler.ru

**Abstract.** 1. The values of adhesion, hardness and viscosity of applied coatings are determined for various types of aluminum powders in a wide range of temperature modes of gas-dynamic spraying. 2. The structure of the coatings was evaluated. The absence of oxidation of the sputtered particles is shown. The distribution of the elemental composition of the coatings is determined as a function of the distance to the coating-base contact zone. 3. The thickness and properties of non-porous Al coatings are controlled by varying the composition of the powder to be sprayed, the temperature regimes and the number of spraying cycles.

#### Введение

Увеличение ресурса работы стальных деталей, работающих в условиях износа, высоких температур и химически активных сред, может достигаться микродуговым оксидированием предварительно нанесенных на стальные поверхности алюминиевых покрытий, когда формируется высоко плотное, твердое покрытие  $Al_2O_3$  с хорошей адгезией и коррозионной стойкостью. Нанесение на стальные детали алюминиевых подслоев, предназначенных к последующей трансформации в  $Al_2O_3$  при микродуговом оксидировании, целесообразно выполнять холодным газодинамическим напылением.

**Цель работы** – оценка структуры, степени адгезии и твердости алюминиевых покрытий, нанесенных холодным газодинамическим напылением, т.к. эти факторы определяют в значительной степени уровень свойств окончательного покрытия из  $Al_2O_3$ .

**Методика.** В качестве материала основы использовалась Сталь 30. Алюминиевые порошки марок А-10-01, А-20-01, А-30-01 напылялись холодным газодинамическим методом на установке ДИМЕТ-405. Температуры динамического потока воздуха на расстоянии 10 мм от среза сопловой насадки СНК-6 на различных режимах приведены в таблице 1.

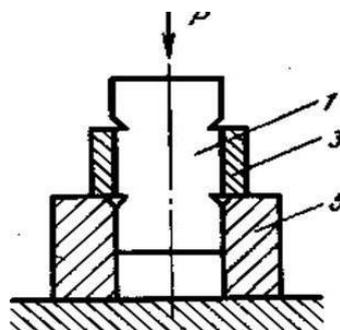
Таблица 1 – Температуры динамического потока воздуха

Температурный режим	Значение температуры, °С
1	140...165
2	235...245
3	315...340
4	390...415
5	495...510

Толщина покрытий варьировалась от ~ 10-12 до ~ 50-80 мкм путем изменения числа циклов напыления. (Принципиально толщина покрытия могла быть увеличена вплоть

до 3000 мкм и выше, однако такая задача в данной работе не стояла.) Толщина покрытий измерялась с помощью широкодиапазонного магнитного толщиномера МТЦ-3 (каждый результат – среднее 5 измерений), а твердость – посредством портативного ультразвукового импедансного твердомера «Константа ТУ» (каждый результат – среднее 5 измерений).

Внешний вид образцов для оценки степени адгезии покрытий штифтовым методом приведен на рисунке 1, а схема определения прочности адгезии покрытия – на рисунке 2. Приведенные значения степени адгезии напыленных покрытий – средний результат 7 испытаний на разрывной машине Instron -3380.



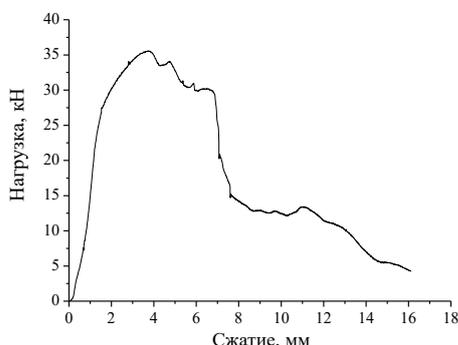
1 – образец, 5 – основание, 3 – покрытие

Рисунок 1 – Образцы для оценки степени адгезии штифтовым методом

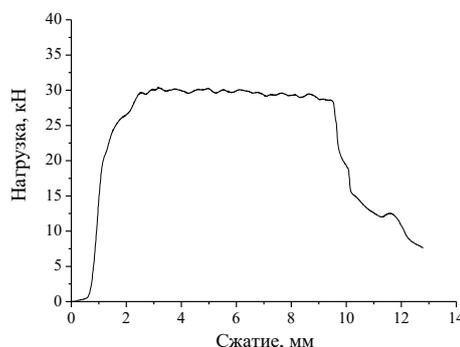
Рисунок 2 – Схема определения прочности адгезии

### Результаты эксперимента

Диаграммы нагрузка-деформация при испытаниях прочности адгезии подслоев представлены на рисунке 3. Результаты испытаний сведены в таблицу 2 (здесь  $\epsilon_k$  – критическая деформация переходной зоны с покрытием до разрушения).



алюминий А-10-01



алюминий А-30-01

Рисунок 3 – Диаграммы нагрузка-деформация при испытаниях прочности адгезии подслоев

Таблица 2 – Механические свойства алюминиевых покрытий (толщина – 10-18 мкм)

	Марка порошка								
	А-10-01			А-20-01			А-30-01		
№ режима	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Адгезия, МПа	85	118	92	89	122	90	80	118	72
Твердость, МПа	980-1140	890-1010	720-780	940-1100	860-940	660-690	880-1020	810-880	600-640
$\epsilon_k$ , %	28	32	39	34	37	42	41	46	46
Пористость, %	0-2	0-2	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1

Наибольшая степень адгезии наблюдается для всех порошков при работе в режиме 3, т.е. при температуре динамического потока воздуха 315-340 °С, причем она выше для порошка марки А-20-01.

Твердость покрытий при переходе к более высокотемпературным режимам напыления 2→3→4 снижается для всех порошков, оставаясь наибольшей для порошка марки А-10-01. По мере снижения твердости возрастает вязкость покрытия и переходной зоны, о чем свидетельствует нарастание критической деформации переходной зоны с покрытием  $\epsilon_k$ .

Пористость покрытий для всех порошков фактически от режимов напыления не зависела, составляя ~ 1%. Шероховатость поверхности покрытий  $Rz = 20-40$ .

Морфология поверхности покрытий представлена на рисунке 4а, а их строение – на рисунке 4б. В беспористой однородной структуре покрытия отсутствуют окисленные по границам зерна металла, так как в составе напыляемой алюминиевой шихты имеются в качестве добавок частицы корунда  $Al_2O_3$  (до 20%). При ударе о покрытие в момент напыления они сбивают образовавшиеся пленки окислов  $Al_2O_3$ , обеспечивая высокую степень адгезии и когезии. Часть частиц  $Al_2O_3$  не улетает из зоны напыления, «завариваясь» в алюминиевой матрице (рисунок 4в). Они способствуют повышению твердости покрытия, не препятствуя развитию объемной диффузии кислорода в алюминий при последующем микродуговом окислении.

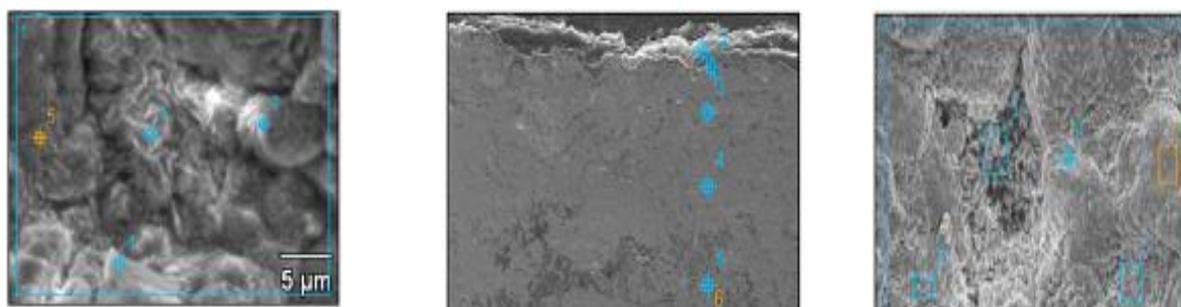


Рисунок 4 – Морфология поверхности покрытия (а), его структура (б) и включения  $Al_2O_3$  (в)

Структура и распределение элементного состава покрытия в зависимости от расстояния до зоны контакта покрытие-подложка приведены на рисунке 5.

Изменение числа циклов (времени) напыления ведет к росту толщины напыляемого слоя для всех технологических режимов. Это сказывается на снижении прочности адгезии и вязкости покрытия (таблица 3).

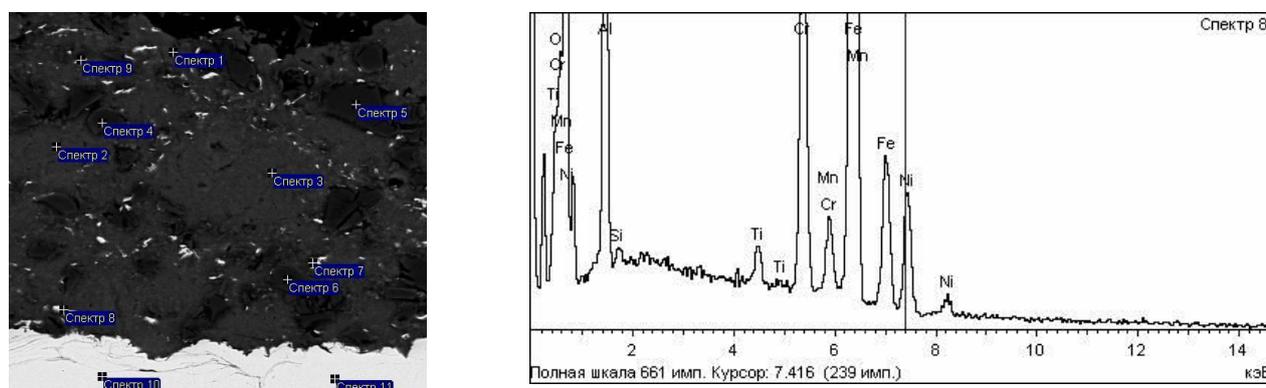


Рисунок 5 – Структура и распределение элементного состава покрытия

Таблица 3 – Механические свойства алюминиевых покрытий (порошок А-20-01, режим 3)

	Цикл напыления		
	8	16	24
Толщина, мкм	18	56	81
Адгезия, МПа	122	104	92
Твердость, МПа	940-1100	860-940	860-940
$\epsilon_k$ , %	42	37	29
Пористость, %	0-1	0-3	0-3

### Заключение

1. Для различных типов алюминиевых порошков в широком диапазоне температурных режимов газодинамического напыления определены значения адгезии, твердости и вязкости наносимых покрытий.

2. Выполнена оценка структуры напыляемых покрытий. Показано отсутствие окисления напыляемых частиц. Установлено распределение элементного состава покрытий в зависимости от расстояния до зоны контакта покрытие-основа.

3. Толщина и свойства беспористых Al покрытий управляемы за счет варьирования составами напыляемого порошка, температурными режимами и числом циклов напыления.

4. Полученные методом холодного газодинамического напыления Al покрытия при однородной структуре и минимальной пористости обладают высоким уровнем адгезии, твердости и вязкости, что позволяет использовать их как подслои на стальные подложки для последующего микродугового оксидирования при создании керамических покрытий на стальных изделиях.

УДК 501.22:621.763

### СИНТЕЗ И УПРОЧНЕНИЕ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Мекто А.Д.<sup>1</sup>, Смоляк В.В.<sup>1</sup>, Калиниченко В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) студенты гр. 10405115 МТФ, Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: itashics@gmail.com

<sup>2</sup>) зав. НИИЛ ПТФ, Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: kvlad@bntu.by

**Abstract.** *The paper presents information about cast composite materials with macroheterogeneous structure with high wear resistance for operation in heavy loaded friction units with small linear velocities intended for use in the units and aggregates of building machinery are used. Described a number of aspects of use of these products.*

**Композитный материал** – многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью и т.д. Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Использование композитов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении её механических характеристик [1, 2].