

## УГЛЕРОД-АЛЮМИНИЕВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

**к.т.н., доц. В.А. Скачков, к.т.н., доц. О.Р. Бережная, аспирант С.С. Сергиенко**

*Запорожская государственная инженерная академия*

*E-mail: [yaskachkov@ukr.net](mailto:yaskachkov@ukr.net)*

*Разработана и экспериментально отработана технология непрерывного нанесения на углеродные волокна медных, хромовых и никелевых электролитических покрытий. Установлено влияние покрытий на свойства волокон. Получены углерод-алюминиевые композиционные материалы с содержанием углеродных волокон до 60 %. Определены параметры плотности, твердости и коэффициентов трения полученных композиционных материалов.*

**УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА, ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ, УГЛЕРОД-АЛЮМИНИЕВЫЕ КОМПОЗИТЫ, ПЛОТНОСТЬ, ТВЕРДОСТЬ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ**

**Введение.** Углерод-алюминиевые композиционные материалы обладают низкой плотностью, а также высокой теплопроводностью, прочностью и износостойкостью, что обуславливает их применение в качестве функциональных элементов узлов трения высокоэнергетических установок. Данные композиционные материалы можно получать как методом жидкофазного совмещения алюминиевой матрицы и углеродного волокнистого наполнителя, так и путем совместного горячего прессования углеродных волокон и алюминиевого порошка.

Для обоих методов остро встает проблема совмещения углеродных волокон и алюминиевой матрицы. При жидкофазном совмещении расплава алюминия и углеродных волокон возможно их химическое взаимодействие, которое сопровождается образованием карбида алюминия и, как следствие, снижением уровня механических характеристик углеродных волокон и прочности адгезионных связей на границе.

При твердофазном совмещении достаточно трудно обеспечить равномерное распределение алюминиевой фазы по объему углеродных волокон. Решение поставленной проблемы обеспечит получение углерод-алюминиевых композиционных материалов с необходимыми физико-механическими характеристиками.

**Анализ особенностей получения углерод-алюминиевых композиционных материалов (УАКМ).** Известно, что растворимость углерода в алюминии очень мала: не превышает 0,5 % при температуре 1570...1770 К и практически отсутствует при температуре 1270...1370 К, а взаимодействие алюминия и углерода при температурах выше 873 К сопровождается образованием карбида алюминия [1 - 4].

Высокая температура начала смачивания углеродных волокон алюминиевыми сплавами объясняется наличием пленок оксида алюминия на поверхности жидкого металла. После удаления оксидов температура начала смачивания алюминиевыми сплавами поверхности углеродных волокон понижается до 1123...1173 К [5].

Одним из путей улучшения смачивания поверхности углеродных волокон является нанесение покрытий, при помощи которых одновременно стремятся решить и проблему защиты данных волокон от взаимодействия с алюминием. Углеродные волокна, покрытые никелем, при температуре 910...970 К хорошо смачиваются эвтектическим алюминиево-никелевым сплавом. Однако при указанных температурах проникновение расплава в межволоконное пространство затруднено, и пропитка не происходит. Условия пропитки заметно улучшаются при использовании углеродных волокон с двойным покрытием: внутренним из карбида кремния, полученным путем газофазного осаждения, и наружным из химически осажденного никеля [5,6].

**Целью работы** является оценка возможности получения углерод-алюминиевых композитов методом порошковой металлургии. Определение технологических параметров в

процессе получения композита, исследование свойств и возможностей применения полученных материалов.

**Нанесение защитных покрытий на углеродные волокна.** Экспериментальные исследования процессов электролитического омеднения, хромирования и никелирования проводили на углеродных волокнах типа УКН-5000, представленных в виде жгута, состоящего из комплекса элементарных волокон.

Для реализации электролитического нанесения защитных покрытий разработали установку, представленную на рис. 1. Привод, смонтированный на установке, обеспечивает возможность изменения в широком диапазоне скорости перемещения углеродных волокон, что позволяет варьировать длительность нанесения защитных покрытий.

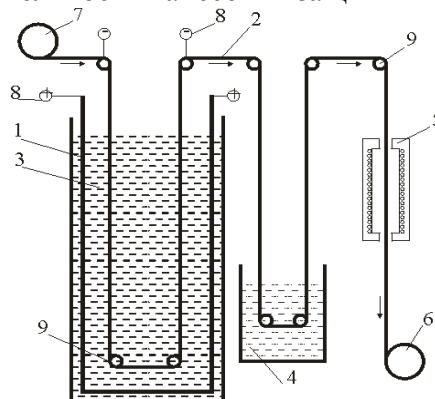


Рис.1. Установка для нанесения электролитических защитных покрытий на углеродные волокна (1 - анод; 2 - углеродное волокно; 3 - электролит; 4 - ванна отмычки волокон; 5 - трубчатая печь для сушки волокон; 6 - привод протяжки волокон; 7 - бобина с волокном; 8 - токоподводы; 9 - направляющие ролики)

Составы электролитов для омеднения, хромирования и никелирования углеродных волокон представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Состав электролитов для электролитического нанесения покрытий на углеродные волокна (г/л)**

Вид покрытия	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{HCl}$	$\text{CrO}_3$	$\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NiSO}_4$	$\text{MgSO}_4$	$\text{KCl}$
Медное	200	60	50					
Хромовое				400	12			
Никелевое						70	45	5

Процессы нанесения защитных покрытий на углеродных волокнах реализованы при температуре 20...30 °С. Параметры процессов электролиза и полученных покрытий представлены в табл. 2. Вид волокна с медным покрытием представлен на рис. 2.

Важнейшим показателем формирования защитных покрытий на жгуте углеродных волокон является однородность толщины покрытия на элементарных волокнах, находящихся в центре и на внешней стороне жгута.

Таблица 2

**Параметры электролитических процессов нанесения покрытий на углеродные волокна**

Катодный ток, А/дм <sup>2</sup>	Напряжение, В	Длительность, с	Тип покрытия	Покрытия	
				Толщина, 10 <sup>3</sup> , мкм	Коэффициент однородности, k <sub>0</sub>
1	2	3	4	5	6
0,30	2,1	60	медь	0,011	0,60
0,30	2,1	120	медь	0,023	0,60
1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
0,30	2,1	180	медь	0,025	0,50
0,15	0,6	60	медь	0,004	0,90

0,15	0,6	120	медь	0,012	0,90
0,15	0,6	180	медь	0,015	0,80
1,27	10	30	хром	0,002	0,70
1,27	10	60	хром	0,003	0,65
1,27	10	120	хром	0,007	0,60
1,27	10	180	хром	0,010	0,55
1,27	10	240	хром	0,012	0,50
0,58	6	30	хром	0,001	0,95
0,58	6	120	хром	0,004	0,85
0,58	6	180	хром	0,005	0,80
0,58	6	240	хром	0,006	0,70
0,58	6	300	хром	0,008	0,65
0,123	6	360	никель	0,200	0,85
0,123	6	600	никель	0,300	0,75
0,25	10	300	никель	0,250	0,80
0,25	10	180	никель	0,470	0,85
0,25	10	120	никель	0,210	0,98
0,50	18	90	никель	0,200	0,75

Распределение толщины покрытия оценивают коэффициентом однородности  $k_o$ , определяемым по формуле

$$k_o = \frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{ц}}$ ,  $h_{\text{в}}$  - толщина защитного покрытия на поверхности элементарных волокон, находящихся в центре и на внешней стороне жгута.

Как следует из табл.1, величина коэффициента однородности увеличивается со снижением плотности катодного тока и сокращением длительности процесса.

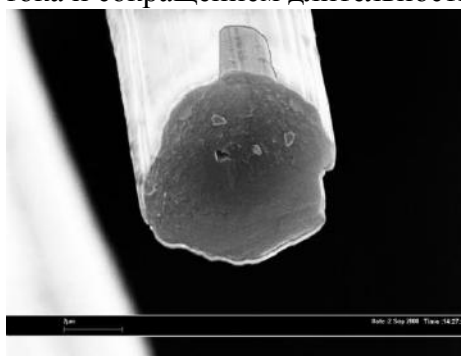


Рис.2. Углеродное волокно с медным покрытием

Из анализа данных, представленных в табл.2 следует, что наиболее полно требованиям по защите углеродных волокон удовлетворяют никелевые покрытия, полученные при величине катодного тока  $0,25 \text{ А/дм}^2$ , напряжении электролиза 10 В и длительности процесса 120 с.

Для оценки влияния защитных покрытий проведено исследование разрывной нагрузки углеродных волокон с покрытием и без него. Разрывную нагрузку углеродных волокон определяли на машине МР-30. Базовая длина волокон составляла 130 мм, скорость нагружения – 30 мм/мин. В качестве примера представлены кривые распределения разрывной нагрузки углеродных волокон с никелевым покрытием (рис. 2).

Оценка математического ожидания распределения разрывной нагрузки для

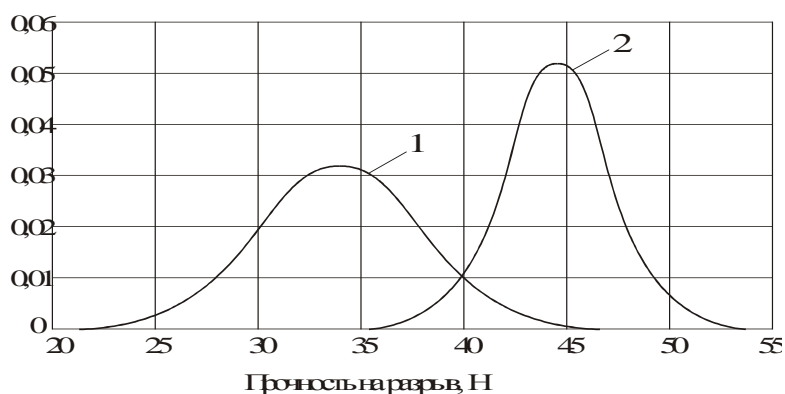


Рис.2. Распределение разрывной нагрузки углеродных волокон

волокон без покрытия составляет 35,3 Н, волокон с покрытием – 44,7 Н. Оценка дисперсии распределения составляет соответственно 35,3 и 16,6. Никелевое покрытие обеспечивает увеличение среднего значения разрывной нагрузки волокон практически в два раза.

**Формование образцов УАКМ.** В данной работе проведён ряд экспериментов по прессованию с целью получения композитных материалов на основе углеродных волокон с алюминиевой матрицей. В качестве матрицы использовались:

- 1) порошок алюминия ПА-0 (гранулометрический состав мкрн <2500 - 95%, >2000 мкрн- 5%.
  - 2) Пудра алюминиевая ПАП (средний линейный размер 20-30 мкм).
- Химический состав матричных материалов представлен в таблице 3.

Таблица 3

**Химический (%) и гранулометрический состав (мкм) матричных материалов УАКМ**

Наименование	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Влага	Гранулометрический состав
ПА-0	98,88	0,50	0,40	0,02	-	0,20	200...250
ПАП	98,99	0,35	0,40	0,05	0,01	0,20	1,0... 30,0

С целью повышения условий совмещения углеродных волокон и матричных порошков использовалось связующее, состоящее из 15 % канифоли и 85 % скипидара.

Горячее прессование производилось по методу одностороннего прессования с двустадийным нагревом. Для удаления связующего образцы предварительно нагревались до 350 °С без давления на открытом воздухе. При 100 °С активно начинается испарение связующего вещества и длится примерно 30 минут. После выдержки устанавливался пуансон и создавалось предварительное давление 40 МПа. В течении 10 минут образец нагревался до 450 °С. При этой температуре прикладывалось усилие 200 МПа и выдерживалось в течении 5 минут. После этого полученная формовка остывала вместе пресс-формой на воздухе.

Таблица 4

**Зависимость свойств прессовок углерод-алюминиевых композитов от их состава**

Состав углерод-алюминиевых композитов, %			Плотность прессовки, г/см <sup>3</sup>	Твердость прессовки, Н/мм <sup>2</sup>	Коэффициент трения, k <sub>тр</sub>
Углеродное волокно	ПА-0	ПАП			
10	45	45	2,18	570	0,82
15	42	43	2,10	500	0,71
30	40	30	2,07	310	0,49
40	40	20	2,06	240	0,39
60	28	12	1,46	270	0,15

Плотность формовок углерод-алюминиевых композитов определяли методом гидростатического взвешивания по стандартной технологии. Твердость определяли по

методу Бринелля на твердомере типа ТШ-2М с использованием стального шарика диаметром шесть мм при величине нагрузки 1840 Н. Время приложения нагрузки – 30 с. (См.табл. 4).

На твердость прессовки существенное влияние оказывает содержание углеродных волокон. С увеличением содержания углеродных волокон до 40...50% твердость прессовки снижается на 60%. При дальнейшем увеличении содержания углеродных волокон до 60% твердость прессовки возрастает на 16% относительно ее минимального значения.

Коэффициенты трения определяли на машине трения СМТ-1 по системе «диск-колодка». Диск выполнен из серого чугуна диаметром 60 мм, образец углерод-алюминиевого композита – в виде колодки с размерами 16 x 11 x 10 мм. Сторону 16 x 10 мм предварительно притирали по рабочей поверхности диска. Удельное давление составляло 1,6 МПа, скорость относительного скольжения – 3,0 м/с. Температура в процессе исследования составляла  $100 \pm 10$  °С.

Из анализа данных табл. 4 следует, что коэффициенты трения углерод-алюминиевых композитов изменяются в широких пределах. В зависимости от содержания углеродных волокон данные композиты могут применяться как в качестве фрикционных, так и антифрикционных материалов.

## ВЫВОДЫ

Определены наиболее рациональные режимы модификации поверхности углеродных волокон электролитическим никелем, получены образцы углерод-алюминиевых композитов с содержанием углеродных волокон от 10 до 60 %. Установлены пределы изменения твердости от 230 до 570 Н/мм<sup>2</sup> и коэффициентов трения от 0,15 до 0,82.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков Л.Р. Алюминиевые композиты триботехнического назначения, полученные методом вакуумно- компрессионной пропитки / Л. Р. Вишняков, В. Л. Коханий, В. П. Мороз, Е. И. Кладницкий // Композиционные материалы в промышленности: материалы 23-й междунар. конф. – Ялта, 2003. – С. 161-162.
2. Структура и свойства композиционных материалов [Текст] : сб. науч. тр. / на- учн. ред. В.С. Портной. – М. : Машиностроение, -1979. – 253 с.
3. Kotval P. S. Wear resistant aluminum – a new approach: cast surface composites / P. S. Kotval // Journal of Metals. – 1974. – V. 26. – № 1. – P. 13-17.
4. Pepper R. T. The tensile properties of graphite-fiber reinforced Al-Si alloy / R. T. Pepper, J. W. Upp // Met. Trans. – 1971. – V. 2. – № 1. – P. 117-120.
5. Салибеков С.Е. Исследование влияния никелевых покрытий на волокне на структуру и свойства композиционного материала алюминий-углеродное волокно [Текст] / С.Е. Салибеков, А.А. Заболоцкий // Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. – М. : Наука.- 1976. – С. 33-37.
6. Ягубец А. Н. Нанесение никелевых покрытий на углеродные волокна химическим и электрохимическим методами / А. Н. Ягубец, Ж. И. Бобанов // Композиционные металлические материалы. – М.: ОНТИ.- 1972. – С. 190-198.