

1. Бледнова Ж.М., Лапшин В.Ю., Проценко Н.А. // Тр. Академэнерго, 2011. № 2. – С 117-127.
2. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. // Полет, 2011. № 6. С. 58-60.
3. Реснина Н.Н, Беляев С.П., Сибирев А.В. // ЖТФ, 2011. Т. 81. С. 144-147
4. Крахин О.И, Кузнецов А.П., Косов М.Г.. Сплавы с памятью. Основы проектирования конструкций. Старый Оскол. «ТНТ», 2011, 396 с.
5. Галкин В.В., Бледнова Ж.М., Проценко Н.А. // Полет 2012. № 5. - С. 20-27.

## УПРОЧНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti-Al-Si-N

Волочко А.Т., Марков Г.В., Мисуню П. Н.

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,  
[misunopavel@gmail.com](mailto:misunopavel@gmail.com)

### Введение

В настоящее время активно разрабатываются и исследуются новые методы модификации поверхностного слоя различными материалами с целью придания им требуемых свойств. Наиболее распространенным среди них является осаждение упрочняющих покрытий вакуумно-дуговым методом [1].

Получение современных упрочняющих наноконкомпозитных покрытий вакуумно-дуговым методом требует осаждения на подложку многокомпонентных потоков плазмы. Эти потоки могут быть получены одновременным испарением отдельных однокомпонентных катодов или одного многокомпонентного катода, содержащего компоненты наносимого покрытия. При использовании отдельных катодов необходимый элементный состав потока достигается сложным и трудоемким подбором технологических режимов испарения каждого из катодов, состава и давления реакционного газа.

В этой связи интерес представляют исследования, в которых наноконкомпозитные покрытия получают на промышленных установках при испарении одного многокомпонентного катода [2].

Целью данной работы было исследование свойства покрытий, полученных при помощи многокомпонентного катода, изготовленного методом литья в вакуумной печи в среде аргона при температуре 1500 °С.

### Материалы и методики

Были проведены исследования образцов молибденовой фольги и силуминовых сплавов АК12М2МgН (эвтектический) и АК20 (заэвтектический), с покрытиями, осажденными из трехкомпонентного катода Ti-Al-Si. Осаждение покрытий производилось вакуумно-дуговым методом. Режимы обработки образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обработки образцов

Номер образца	Катод	Подложка	Давление азота, Па	Ток дуги катода, А	Напряжения смещения, В	Время осаждения, мин	Температура, °С
1	63Ti-32Al-5Si	AK12M2MgH	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100	3,5	300
2		AK20	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100		
3		Mo-фольга	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100		

Анализ фазового состава образцов проводился при помощи рентгеноструктурного анализа (РСА) на диффрактометре ДРОН-4 в геометрии Брегг-Брентано с излучением  $\text{CuK}_\alpha$ . Исследования элементного состава проводились на энергодисперсионном рентгеновском микроанализаторе (ЭДРМ) Rontec.

Измерение микротвердости выполнялось на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 150 г

### Результаты и их обсуждение

Результаты ЭДРМ исследований содержания элементов в приповерхностной области образца покрытия представлены в табл. 2. Видно, что приповерхностный слой содержит титан, алюминий, кремний. Регистрация азота методом ЭДРМ затруднена ввиду присутствия в покрытии титана, спектральные характеристики которого совпадают с характеристиками азота и препятствуют расчету его содержания. В табл. 2 также приведена доля (относительное содержание) титана, алюминия и кремния в их суммарном содержании в покрытиях и в катоде. Для катода эти доли составляют 63% Ti, 32% Al и 5% Si. В покрытиях доля титана меньше – около 60%. Доля кремния также меньше, – около 4,5%. Доля же алюминия в покрытиях выше, чем в катоде (35,2%). Это связано, вероятнее всего, с тем, что среди титана, алюминия и кремния алюминий обладает наименьшей температурой плавления. При осаждении покрытия катодное пятно перемещается по поверхности трехкомпонентного катода и в первую очередь испаряет из него атомы алюминия, что приводит к большему относительному содержанию алюминия в покрытии, чем в катоде.

**Таблица 2.** Среднее содержание элементов в фольге молибдена с покрытием Ti–Al–Si–N и относительное содержание титана, алюминия и кремния в покрытии и в катоде

	Концентрация элемента, ат.%						
	Mo	Ti	Al	Si	Cu	Ni	Fe
средняя по поверхности	66,67± 7,38	19,84± 2,06	11,58± 1,75	1,49± 0,54	0,22± 0,38	0,10± 0,42	0,10± 0,41
X/(Ti+Al+Si), %	–	60,3	35,2	4,5	–	–	–
X/(Ti+Al+Si) <sub>катода</sub> , %	–	63	32	5	–	–	–

В результате РСА было установлено, что помимо рефлексов, которые были в исходной молибденовой фольге, на спектрах с покрытиями появились дополнительные рефлексы (рис. 1). В основном, спектры обоих образцов схожи, однако имеется отличие. На спектре образца с покрытием, осажденном при нагреве, следует отметить наличие широкого гало в диапазоне углов от 20 до 45 градусов. На спектре образца с покрытием Ti – Al – Si – N, осажденного без нагрева, широкого гало в диапазоне углов от 20 до 45 градусов нет, но в этом диапазоне присутствует большое количество пиков. Часть из них можно связать с нитридом AlN на углах 33,2, 36,1 и 37,9 градуса и интерметаллидом Al<sub>4</sub>Si на угле 31,5 градуса. В самом начале спектра до угла 22 градуса появился широкий пик, который совпадает с пиком оксида Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Особо следует отметить появившийся пик на угле 43,5 градуса, расположенный как раз между угловыми положениями рефлексов нитрида TiN и чистого алюминия, указанными на рис. 1. Этот пик также присутствует и на втором спектре. Согласно литературным данным [3], такой сдвиг расположения пика связан с растворением алюминия в нитриде титана с образованием фазы (Ti, Al)N.

В табл. 3 представлены результаты измерения микротвердости покрытий. Видно, что образцы с покрытиями обладают большей микротвердостью, чем исходные сплавы.

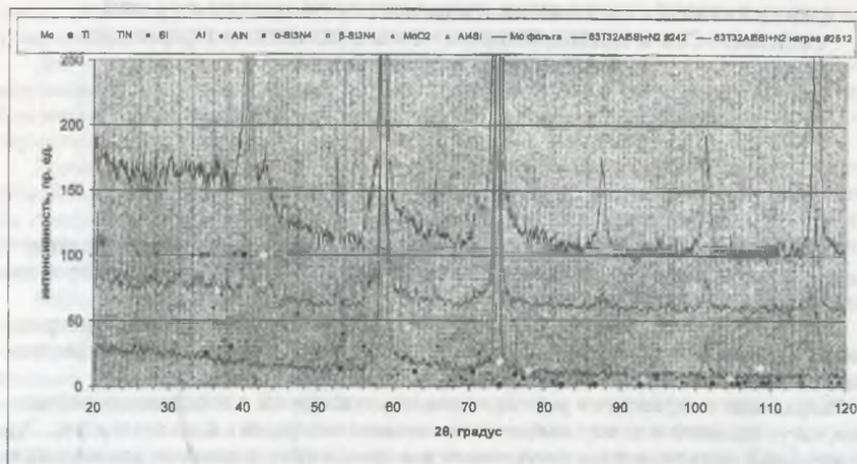


Рис. 1. РСА спектры образцов с покрытиями Ti–Al–Si–N на молибденовой фольге, осажденных без и с нагревом до 300 °С

Таблица 3. Результаты измерений микротвердости

Образец	Твердость, ГПа
AK12M2MgH исх.	1,236±0,226
251 (AK12M2MgH + Ti – Al – Si – N)	18,09±0,293
AK20 исх.	0,947±0,092
252 (AK20 + Ti – Al – Si – N)	19,37±0,627

### Заключение

В ходе выполнения работы был проведен анализ элементного и фазового состава и исследована микротвердость покрытий.

В покрытия Ti – Al – Si – N, полученных с применением многокомпонентного катода, наблюдаются нитрид AlN, интерметаллид Al<sub>4</sub>Si, оксид Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> и нитрид TiN. Также было установлено, что нанесение многокомпонентного покрытия повышает микротвердость материала в целом с 0,947 до 19,37 ГПа.

### Список литературы

1. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Б.А., Эйзнер, Г.В Марков Минск: Наука и техника, 1991. — 95с.
2. Алтухов, С.И. Исследование процесса СВС прессования многокомпонентных катодов на основе системы Ti–В для нанесения вакуумно-дуговых покрытий / А.А. Ермошкин, К.С. Сметанин, А.Ф. Федотов, В.Н. Лавро, Е.И. Латухин, А.П. Амосов Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. — т. 13, № 4, С. 77–83
3. L. Huitman Mechanical and stability of TiN/NbN superlattice thin films. Vacuum 57 (2000) 1-30.