

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ И ИЗНОСА ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

С.Ф. Дудник, А.П. Любченко\*, А.К. Олейник\*, А.В. Сагалович, В.В. Сагалович

*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)*

*\*Завод им. Малышева (Харьков)*

*Украина*

Поступила в редакцию 09.03.2004

Исследованы характеристики трения и износа покрытий, полученных методом вакуумного ионно-плазменного напыления на образцы жаропрочного деформируемого сплава АК4-1, при трении скольжения в условиях граничной смазки, соответствующих условиям работы деталей цилиндра-поршневой группы двигателей. Результаты испытаний показывают, что нанокompозитные вакуум-дуговые покрытия на сплаве АК4-1 позволяют предотвратить задиры при работе в паре с гильзовым чугуном. При этом относительное увеличение стойкости достигает 20 – 80 раз, а износ контртела уменьшается в 4 – 5 раз.

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований к топливной экономичности, массогабаритным показателям, надежности и ресурсу двигателей обуславливают необходимость разработки и освоения новых конструкторских решений, прогрессивных технологий и материалов с повышенными техническими характеристиками [1]. Одним из направлений работ в этом плане является повышение надежности и ресурса работы узлов трения.

Использование сплавов на основе алюминия для изготовления поршней дизелей большой мощности с целью улучшения массогабаритных и других показателей двигателя сопряжено с определенными трудностями, обусловленными недостаточной износостойкостью и задиростойкостью этих сплавов.

В связи с резким отличием требований к свойствам материалов деталей узлов трения в объеме и в тонком приповерхностном слое, определяющем параметры трения и изнашивания, все более актуальным является использование новых технологий нанесения защитных, износостойких, антифрикционных покрытий, обеспечивающих расширение возможностей формирования рабочих слоев, соответствующих критериям совместности [2], а также достижение безремонтности машин при комплексном решении проблемы резкого многократного повышения ресурса деталей с полным учетом всех предельных состояний.

Огромный потенциал в создании материалов с широким комплексом уникальных свойств содержат нанослойные нанокompозиционные покрытия благодаря возможности сочетания в разнообразнейших комбинациях разных материалов и вариации толщины слоев.

Правильный выбор индивидуальных материалов слоев, методов осаждения и оптимизация пара-

метров создают предпосылки синтеза материалов с уникальными физико-химическими свойствами, в т.ч. с улучшенными трибологическими характеристиками [3, 4].

Среди методов нанесения защитных покрытий особое место занимают вакуум-плазменные и плазмохимические методы, которые позволяют получать покрытия из самых разнообразных материалов, обладающих высокой адгезией к подложке, износостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью и другими свойствами. Одним из таких методов является метод вакуум-дугового напыления, который получил широкое применение как способ повышения работоспособности режущего инструмента, деталей машин, приборов.

Исследование износостойкости и фрикционных свойств трущихся поверхностей при трении наиболее распространенного покрытия TiN и некоторых других, полученных методом вакуум-дугового напыления на конструкционных и инструментальных сталях [5,6], показали их высокую износостойкость и возможность получения относительно низких значений коэффициентов трения покрытий при работе в паре с некоторыми материалами, в частности, с серым легированным чугуном, который широко используется при изготовлении гильз цилиндров дизелей.

Целью данной работы является получение износостойких антизадирных покрытий методом вакуум-дугового напыления на сплаве АК4-1 и исследование характеристик трения и износа композиций “сплав АК4-1 - покрытие” при работе в паре с гильзовым чугуном в условиях трения скольжения при граничных условиях смазки, соответствующих условиям работы деталей цилиндра-поршневой группы двигателей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для нанесения покрытий использовалась модернизированная установка для вакуум-дугового напыления с вакуумной камерой большого объема и автоматизированной системой управления работой вакуум-дуговыми испарителями и системы подачи реакционных газов в рабочий объем камеры. Покрытия наносились по заданной программе, в которой задавались время, последовательность и режим работы испарителей, системы подачи реакционных газов, что позволяло получать многослойные и многокомпонентные покрытия с изменяемым составом по толщине. При отработке процессов нанесения покрытий основной задачей был выбор параметров, обеспечивающих получение прочносцепленных слоев выбранных составов без разупрочнения материала основы. Для деформируемого жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1 такие режимы не должны снижать его твердость ниже 110 единиц по шкале Бринелля. Покрытия получали распылением электродов, изготовленных из Mo, Al и Ti в вакууме или в среде реакционного газа. Давление реакционного газа, в качестве которого использовался азот, выбиралось таким, чтобы получить типичные значения микротвердости соответствующих соединений. В табл. 1 приведены составы исследованных покрытий, значения их микротвердости и толщины.

Таблица 1

Исследованные покрытия		
Состав	Микротвердость, ГПа	Общая толщина, мкм
Mo	4,0	4 ÷ 5
AlN	30	5 ÷ 6
TiN	22	5 ÷ 6
Mo + Mo <sub>2</sub> N	25	(~0,3)+(4÷5)
AlN + Al	30	(5÷6) + (0,1)
Mo+Mo <sub>2</sub> N+Mo	–	(~0,3)+(2÷2,5)+(2,5)
(AlN – Ti) нанокompозит	20	5 ÷ 6
(TiN – AlN) нанокompозит	35	5 ÷ 6
(TiN – AlN) нанокompозит + Mo	–	(5 ÷ 6) + (2,5)

Покрытия наносили на образцы, которые используются при испытаниях на машинах трения типа СМЦ-2 и 2070 СМТ-1 – “диск” и “колодку”. Рабочие поверхности образцов перед нанесением покрытий окончательно обрабатывали тонким точением до шероховатости, соответствующей 7-му классу. Рабочие поверхности контртел из

серого легированного чугуна, использующегося для изготовления гильз цилиндров дизелей, окончательно обрабатывали шлифованием, шероховатость соответствовала  $R_a=0,30$  мкм. Диаметр “диска” – 50 мм, высота 12 мм, площадь “колодки” – 2 см<sup>2</sup>.

Испытания на машине трения 2070 СМТ-1 проводили при ступенчатом нагружении в интервале нагрузок 1 – 10 МПа. Скорость скольжения 1,3 м/с, смазка по методу окунания маслом М14Вс при температуре 70° С. Время испытаний на каждой ступени нагружения – 120с. До и после испытаний образцы взвешивали на аналитических весах ВЛА-200 с точностью  $1 \cdot 10^{-4}$  г для оценки износостойкости и изнашивающей способности покрытий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены результаты измерения величины износа исследуемых покрытий, нанесенных на “диски” из сплава АК4-1, а также “колодок” из гильзового чугуна после испытаний при ступенчатом нагружении до 6 МПа. Для сравнения испытаны образцы “дисков” без покрытия.

Таблица 2  
Результаты измерений величин износа при нагружении до 3 МПа  
(диск АК-4-1, колодка гильзовый чугун)

Покрытие	Износ диска, г	Износ колодки, г	Относительное увеличение стойкости
без покрытия	0,0343	+0,0004	1
Mo	0,0632	0,0001	2,1
AlN	0,0006	0,1233	64,2
TiN	0,0023	0,0476	28,7
Mo + Mo <sub>2</sub> N	0,018	0,0497	56
(TiN – AlN)	0,0006	0,0340	87,9
(AlN – Ti)	0,0716	0,0007	0,7
AlN+Al	0,0008	0,0295	47,6
Mo+ Mo <sub>2</sub> N+Mo	0,0064	0,0003	20,6

Анализ показывает, что образцы “дисков” без покрытия интенсивно изнашиваются, при этом обнаруживается перенос материала на чугун, что характеризуется привесом (+0,0004 г) колодки.

Покрытие из чистого Mo имеет меньшую скорость линейного износа по сравнению со сплавом АК4-1 и весьма незначительно изнашивает контртело, но, в целом, проявило низкую износостойкость и в процессе испытаний практически полностью было изношено до основы. Сравнение результатов испытаний нитридов Al, Ti и Mo

показывает, что наиболее износостойким является покрытие AlN, однако при его испытании происходит наибольший износ контртела, что может характеризовать абразивные свойства этого покрытий. Покрытия Mo<sub>2</sub>N и TiN показали примерно одинаковые результаты по изнашивающей способности.

Испытания нанокompозитного покрытия (TiN – AlN) показали, что его износостойкость такая же, как износостойкость покрытия AlN, но изнашивающая способность по отношению к контртелу существенно (более чем в 3 раза) меньше. Еще меньшую изнашивающую способность по отношению к контртелу показало нанокompозитное покрытие (AlN-Ti), однако при трении с нагрузением до 3 МПа происходит схватывание с разрушением покрытия и подповерхностных слоев металла, чем и объясняется столь высокие значения износа диска.

В табл. 3 показаны результаты последующих повторных испытаний некоторых вариантов исследованных покрытий до нагрузки 10 МПа, максимально возможной при испытаниях по выбранной схеме.

Таблица 3  
Результаты измерений величин износа при нагружении до 10 МПа (диск АК-4-1, колодка гильзовый чугун)

Покрытие	Износ диска, г	Износ колодки, г	Коэффициент трения $f_{тр}$ , при нагрузке 6 МПа
–	0,0113*	+0,0002	0,03
AlN	0,0014	0,1228	0,12
TiN	0,0013	0,0496	0,14
Mo <sub>2</sub> N	0,0032	0,0815	0,12
AlN + Al	+0,0010	0,0614	0,11
(TiN – AlN)	0,0007	0,1188	0,12
Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,1934	0,0014	0,1

\* Нагружение до 6 МПа.

На величины износов образцов после повторных испытаний в некоторой степени повлияли процессы приработки происходившие при испытаниях на первом этапе. Так, величина износа сплава АК4-1 без покрытия оказалась меньшей, чем при первых испытаниях, это верно и для покрытия TiN. Все исследованные покрытия выдержали максимальные нагрузки без разрушения. Покрытие Mo<sub>2</sub>N + Mo, как и в первой серии испытаний, показало наименьшую изнашивающую способность по отношению к контртелу, а нано-

композитное покрытие (TiN – AlN) оказалось наиболее износостойким. Поскольку величина нагрузки ограничена возможностями нагружающего механизма машины трения, для оценки предельной работоспособности покрытия Mo<sub>2</sub>N + Mo произведено повторное нагружение до нагрузки 10 МПа. При повторном нагружении произошел износ покрытия до основного материала при нагрузке 6 МПа, однако схватывания и задиорообразований при этом не обнаружено, о чем свидетельствует ход изменения коэффициента трения ( $f_{тр}$ ) до максимальной нагрузки 10 МПа.

Зависимости коэффициента трения от нагрузки представлены в табл. 4 (нагружение до 3 МПа) и табл. 5 (повторное нагружение до 10 МПа).

Таблица 4  
Зависимость коэффициента трения ( $f_{тр}$ ) от нагрузки при нагружении до 0,6 кН (“диск” – АК4-1 с покрытиями, “колодка” – гильзовый чугун)

Покрытие	Значение $f_{тр}$ , при нагрузке P, кН		
	0,2	0,4	0,6
–	0,15	0,16	0,14
Mo	0,14	0,15	0,14
AlN	0,12	0,15	0,146
TiN	0,05	0,15	0,14
Mo <sub>2</sub> N	0,1	0,135	0,14
AlN+Al	0,02	0,05	0,093
(AlN – Ti)	0,024	0,085	0,097
(TiN – AlN)	0,054	0,05	0,08
Mo+Mo <sub>2</sub> N+Mo	0,04	0,033	0,027

Анализ полученных данных показывает, что сплав АК4-1 без покрытия при повторном нагружении выдерживает нагрузку до 6 МПа, дальнейшее нагружение приводит к резкому возрастанию момента трения и началу схватывания. Уровень значений коэффициента трения при повторном нагружении существенно уменьшился, что объясняется приработкой рабочих поверхностей. Уменьшение коэффициентов трения исследованных покрытий при повторных нагружениях менее выражено, что может быть связано с относительно более высокой твердостью и износостойкостью исследованных покрытий. Однако, при еще одном нагружении покрытия Mo+Mo<sub>2</sub>N+Mo до предельной нагрузки 10 МПа, было зарегистрировано значительное уменьшение коэффициентов трения, что характеризует возможность использования этого покрытия как износостойкого и антифрикционного в соответствующих условиях работы.

Таблица 5

Зависимость коэффициента трения ( $f_{тр}$ ) от нагрузки при нагружении до 2,0 кН  
 (“диск” – АК4-1 с покрытиями, “колодка” – гильзовый чугун)

Покрытие	Значение $f_{тр}$ , при нагрузке $P$ , кН										Примечания
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
–	0,03	0,015	0,014	0,012	0,012	0,03	–	–	–	–	
AlN	0,06	0,095	0,12	0,12	0,12	0,12	0,114	0,115	0,113	0,115	
TiN	0,17	0,15	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13	0,135	0,137	0,135	
Mo <sub>2</sub> N	0,09	0,1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,126	0,13	0,124	
AlN + Al	0,016	0,02	0,07	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	
(TiN – AlN)	0,03	0,075	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,116	0,115	
Mo + Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,022	0,04	0,06	0,11	0,11	0,1	0,11	0,11	0,116	0,114	I-е нагружение
–	0,02	0,005	0,005	0,006	0,007	0,007	0,008	0,005	0,008	0,008	II-е нагружение

Результаты испытаний выбранных вариантов покрытий по схеме 2 при нагружении до 10 МПа представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Износ покрытия при ступенчатом нагружении до 10 МПа  
 (“диск” – гильзовый чугун, “колодка” – АК4-1)

Покрытие материала поршня	Износ колодки (поршня), г	Износ диска (гильзы), г	Примечания
–	0,0075	0,0023	Нагружение до 8 МПа
Mo + Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,0002	0,0034	Нагружение до 8 МПа
Mo + Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,0005	0,0062	
(TiN – AlN)	0,0000	0,0290	
(TiN – AlN) + Mo	+0,0002	0,0145	

Таблица 7

Зависимость коэффициента трения ( $f_{тр}$ ) от нагрузки  
 (“колодка” – АК4-1 с покрытиями, “диск” – гильзовый чугун)

Покрытие	Значение $f_{тр}$ , при нагрузке $P$ , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
–	0,042	0,02	0,013	0,01	0,011	0,01	0,011	0,016	–	–
Mo + Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,094	0,105	0,115	0,114	0,11	0,107	0,106	0,106	0,107	0,098
Mo + Mo <sub>2</sub> N + Mo	0,13	0,125	0,113	0,99	0,92	0,085	0,086	0,09	0,092	0,093
(TiN – AlN)	0,1	0,127	0,137	0,133	0,127	0,125	0,121	0,121	0,121	0,12
(TiN – AlN) + Mo	0,16	0,155	0,145	0,135	0,13	0,127	0,125	0,125	0,124	0,123

Испытания сплава АК4-1 без покрытия, показали резкое увеличение моментов трения и начало задириобразования при нагружении выше 8 МПа. Образцы с покрытиями выдерживают максимальные нагрузки без задириобразования и разрушения. Наиболее высокую износостой-

кость показало покрытие (TiN-AlN), однако оно обладает и наибольшей изнашивающей способностью по отношению к контртелу. Более предпочтительным является покрытие Mo+Mo<sub>2</sub>N+Mo, для которого, как показали испытания до нагрузки 8 МПа, износ контртела

не намного превосходит этот показатель при испытаниях сплава АК4-1 без покрытия при достаточно высокой износостойкости самого покрытия.

## ВЫВОДЫ

1. Проведены испытания различных покрытий, полученных методом вакуумного ионно-плазменного напыления на образцы жаропрочного деформируемого сплава АК4-1, при трении скольжения в условиях граничной смазки.
2. Результаты испытаний показывают, что нанокompозитные вакуум-дуговые покрытия на сплаве АК4-1 соответствующих составов имеют низкие значения коэффициентов трения и позволяют предотвратить задиры при работе в паре с гильзовым чугуном в условиях трения скольжения при граничных условиях смазки, соответствующих условиям работы деталей цилиндра-поршневой группы двигателей. При этом относительное увеличение стойкости достигает 20 – 80 раз, а износ контртела уменьшается в 4 – 5 раз.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРТЯ І ЗНОСУ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ

С.Ф. Дудник, А.П. Любченко, А.К. Олейник,  
А.В. Сагалович, В.В. Сагалович

Досліджено характеристики тертя і зносу покриттів, отриманих методом вакуумного іонно-плазмового напылення на зразки жароміцного деформуючого сплаву АК4-1, при терті ковзання в умовах граничного змащення, що відповідають умовам роботи деталей циліндро-поршневої групі двигунів. Результати випробувань показують, що нанокompозитні вакуумно-дугові покриття на сплаві АК4-1 дозволяють запобігти задиру при роботі в парі з гільзовим чавуном. При цьому відносне збільшення стійкості досягає 20 – 80 разів, а знос контртіла зменшується в 4 – 5 разів.

3. Наилучшим сочетанием износостойкости, изнашивающей способности по отношению к гильзовому чугуну и антифрикционным свойствам из исследованных вариантов покрытий обладают покрытия  $Mo+Mo_2N+Mo$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Н.Ф. Чайнов. Проблемы и перспективы поршневого двигателестроения в России// Двигателестроение. – 2001. – № 4. – С. 46-47.
- 2 Н.А. Бугас. Решенные и нерешенные задачи по совместимости трибосистем// Трение и износ. – 1993. – № 14. – С. 25-33.
- 3 H.G. Prengel et al. A new class of high performance coatings for carbide cutting tools// Surf. Coat. Technol. – 2001. – № 139. – P. 25-34.
- 4 Sam Zhang et al. Magnetron sputtering of nanocomposite (Ti,Cr)CN/DLC coatings// Surf. Coat. Technol. – 2002. – № 162. – P. 42-48.
- 5 А.П. Любченко и др. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам// Трение и износ. – 1983. – № 5. – С. 892-897.
- 6 Г.И. Костюк. Физико-технические основы комбинированных технологий напыления покрытий, ионной имплантации, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения. – Харьков.: АИНУ, 2002. – 1030 с.

## THE INVESTIGATION OF FRICTION AND WEAR CHARACTERISTICS OF ION-PLASMA COATINGS, RECEIVED ON THE ALUMINUM ALLOY

S.F. Dudnik, A.P. Lubchenko, A.K. Oleynik,  
A.V. Sagalovich, V.V. Sagalovich

The friction and wear characteristics of sliding friction in conditions of boundary lubrication for coatings, received by ion-plasma method on the heat resistant deformed alloy of АК4-1 type are investigated. The test results show that nanocomposite vacuum arc coatings with corresponding composition on the АК4-1 type alloy allow to ward off tears under working in pair with case cast iron in the conditions of sliding friction and boundary lubrication conditions, corresponding to engine cylinder-piston group machine parts working condition. More over relative stability increasing achieve 20 – 80 times, and contrabody wear decrease of 4 – 5 times.