



## АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ $Al_2O_3$ , ПРИМЕНЯЕМОГО В СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Е. А. АСТАХОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты антифрикционных и коррозионных испытаний детонационного покрытия из  $Al_2O_3$  в однородной паре и паре с высокооловянистой бронзой в воде, в том числе с добавлением консистентной смазки, а также после длительных сравнительных испытаний в паре с капролоном. Установлена удовлетворительная работоспособность образцов, имитирующих работу подшипников узла опоры баллера руля.

*Ключевые слова:* детонационное покрытие, оксид алюминия, коррозионные свойства, пары трения, удельное давление, коэффициент трения, антифрикционные свойства

Жизненно важными, обеспечивающими эксплуатационную надежность и безопасность плавания судов, являются устройства винторулевого комплекса — рулевые, дейдвудные, гребные валы и винты [1]. В связи с этим выбор материала покрытия для замены бронзовых облицовок на валопроводах, обеспечивающего повышение ресурса подшипникового узла и, как следствие, сокращение расходов на ремонт из-за коррозии и износа бронзы, является актуальной задачей.

Результаты исследований, приведенные в работах [2, 3], свидетельствуют, что детонационное покрытие из  $Al_2O_3$  отличается высоким уровнем прочности сцепления (30...35 МПа) и микротвердости ( $HV$  11500...12500 МПа).

В настоящей работе исследованы антифрикционные свойства и коррозионная стойкость однородных ( $Al_2O_3-Al_2O_3$ ) и разнородных пар трения ( $Al_2O_3$ -высокооловянистая бронза Бр.ОФ-10-1). Детонационное покрытие наносили на образцы из стали 45, нержавеющей стали 08X18H10T и титанового сплава ЗМ.

Исследование антифрикционных свойств проводили на машине пяточного трения конструкции ЛПИ [4]. Машина предназначена для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа трения различных сочетаний пар материалов на парах образцов, состоящих из колец высотой 8 мм с внешним 52 мм и внутренним 32 мм диаметрами и трех столбиков диаметром 5 мм и высотой 14 мм, помещенных в специальную шайбу. Критериями оценки работоспособности при трении служили износостойкость, коэффициент трения и состояние рабочих поверхностей. Общий путь трения при испытаниях составлял 5 км. Износостойкость оценивали по относительному критерию износа [5].

В однородной паре трения оксид алюминия при удельном давлении 5 МПа обеспечивал работоспособность трущихся поверхностей на протяжении 5 км без повреждения, при этом износ

кольца составил 0,8 мкм, столбиков — 8,9 мкм, коэффициент трения — 0,346...0,585.

В разнородной паре трения в качестве образцов-столбиков использовали бронзу марки Бр.ОФ-10-1. При трении последней в воде при удельном давлении 10 МПа наблюдали перенос («намазывание») на поверхность покрытия из оксида алюминия, что увеличило коэффициент трения ( $\mu$ ) до 0,812. Возрос также износ бронзы, поскольку в этом случае происходило трение одноименных материалов. Сильное «намазывание» бронзы на поверхность покрытия, как правило, сопровождалось появлением усталостного выкрашивания и образованием трещин в покрытии. Износ бронзы достигал 745 мкм. Учитывая низкую работоспособность в воде бронзы Бр.ОФ-10-1 (при трении по покрытию из оксида алюминия) проведены ее дополнительные испытания при трении с добавлением в воду разовой смазки через каждый километр пути трения. Использование морской консистентной смазки марки АМС-1 (рис. 1) резко изменило условия трения — значительно уменьшились «намазывание» бронзы и коэффициент трения. Износ бронзы при этом сократился более чем в 30 раз. Расчетная оценка износа бронзовой втулки и напыленного слоя из  $Al_2O_3$  на баллер показала, что за два года эксплуатации износ подшипниковой опоры баллера из Бр.ОФ-10-1 может достигать 500 мкм, а напыленного слоя — до 25 мкм (при условии применения консистентной смазки в воде). Применение этой пары трения без смазки недопустимо.

Дейдвудные подшипники валопроводов в зависимости от района плавания и типа судна изготавливают из резины, капролона или бокаута. В последнее время наиболее распространены подшипники из капролона. Вторым элементом пары трения является бронзовая рубашка, которую насаживают на главный вал с помощью горячей или гидропрессовой посадки.

Обычно удельное давление в подшипнике не превышает 0,3 МПа, а скорость трения — 6 м/с [6]. Исследование работоспособности покрытия  $Al_2O_3$  применительно к условиям работы подшипников валопровода проводили на машине трения

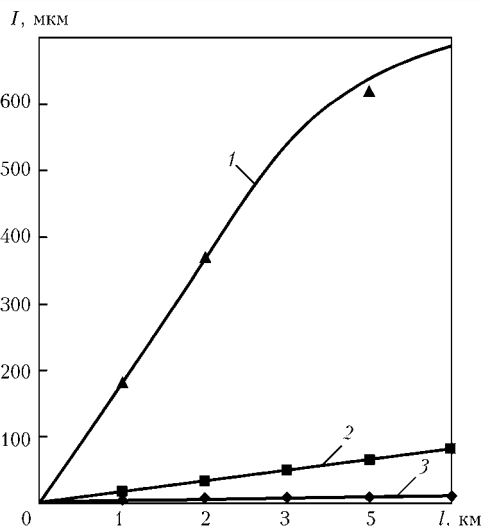


Рис. 1. Зависимость износа  $I$  пары трения от пути трения  $l$  при скорости трения  $v = 0,25$  м/с и удельном давлении  $q = 5$  (1), 10 (2), 20 МПа (3): 1 —  $Al_2O_3-Al_2O_3$  в воде ( $\mu = 0,346...0,486$ ); 2 — Бр.ОФ-10-1- $Al_2O_3$  в воде + АМС-1 ( $\mu = 0,092...0,162$ ); 3 — Бр.ОФ-10-1- $Al_2O_3$  в воде ( $\mu = 0,380...0,812$ )

марки СМЦ-2 при скорости трения 2 м/с и удельном давлении 0,5 МПа.

Испытаниям подвергали образцы, имитирующие систему вал-подшипник. Подшипником служила втулка диаметром 40 мм и шириной 25 мм из капролона, запрессованная в специальную обойму, которую устанавливали на машину для испытаний. Покрытие наносили на наружную поверхность вала и шлифовали. Образцы помещали в герметичную испытательную камеру, заполненную проточной водой. Образцы-валики замеряли на вертикальном компараторе ИЗВ-2 с ценой деления 0,1 мкм, а втулки — прибором внутреннего измерения с ценой деления 0,01 мм. Замеры перед испытанием осуществляли перед и после приработки, а также после каждых 50 км пути трения. Исследуемую пару подвергали приработке при постепенном увеличении удельного давления от 0,1 до 0,5 МПа. Испытаниям подвергали покрытия  $Al_2O_3$  в паре с капролоном. Для получения сравнительных данных испытывали также пару Бр.ОФ-10-1-капролон, широко применяемую в судостроении. Результаты длительных сравнительных испытаний (рис. 2) показали, что износ ка-

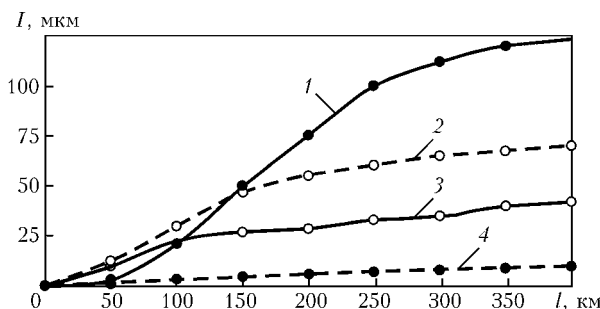


Рис. 2. Зависимость износа пар трения капролон- $Al_2O_3$  (1, 4) ( $\mu = 0,05...0,16$ ) и капролон-бронза (2, 3) ( $\mu = 0,05...0,20$ ) при  $v = 2$  м/с и  $q = 0,5$  МПа: 1, 3 — износ капролона; 2, 4 — то же соответственно бронзы и покрытия из  $Al_2O_3$

ролона в обеих парах трения зависит от пути трения. С его увеличением она снижается и стабилизируется. При трении капролона по высокоолеовянистой бронзе его износ ниже, чем при трении по покрытию из  $Al_2O_3$ . Однако износ самой бронзы намного выше, чем покрытия. На трущихся поверхностях образцов с покрытием видимых повреждений не наблюдалось, а происходило их постепенная полировка. При трении капролона по бронзе имело место внедрение частиц износа бронзы в капролон, вплоть до образования на его поверхности сплошного слоя из бронзы. Этим, видимо, объясняется повышенный износ бронзовой втулки в паре с капролоном по сравнению с парой капролон-покрытие.

Изменение коэффициентов трения в испытываемых парах приведено на рис. 2. Наибольшие их значения соответствуют началу приработки и моменту запуска машины трения, а наименьшие — моментам установившегося трения и трения в конце каждого испытания.

Для определения коррозионной стойкости покрытия из  $Al_2O_3$  были проведены электрохимические измерения (снятие поляризационных кривых, измерение стационарных потенциалов, потенциалов контактных пар) и испытания на общую, контактную и щелевую коррозию.

Поляризационные кривые получали в динамическом режиме со скоростью 200 мВ/мин в нормальном (0,5 н.) растворе NaCl.

Покрытие из  $Al_2O_3$  как электроизолирующее не принимает участия в электродном процессе,

**Результаты коррозионных испытаний различных покрытий из  $Al_2O_3$**

Детонационное покрытие	Основа	Время испытания, ч	$\Phi_{стат}$ , В	Характер коррозионных поражений в контакте			
				без контакта	со сплавом ЗМ	с графитом	с углеродистой сталью
$Al_2O_3$	Сплав ЗМ	3700	+0,07	Видимые поражения отсутствуют	Видимые поражения отсутствуют	Видимые поражения отсутствуют	—
	Сталь 08Х18Н9Т	1500	+0,05	То же	—	То же	—
	Сталь 45	2000	-0,32	Наличие бурых пятен, трещина в покрытии — коррозия основы под покрытием	—	Наличие трещины в покрытии, сильная коррозия основы. Скорость $\gamma_2$ коррозии 0,04 г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Налет продуктов коррозии стали 45
$Al_2O_3$ с пропиткой герметиком «Анатерм-1»	Сталь 45	1500	-0,10	Видимые поражения отсутствуют	—	Видимые поражения отсутствуют	—



но в связи с наличием в нем пор возникает компрессионный потенциал, измеряющий электрохимические характеристики.

Измерение стационарного потенциала  $\Phi_{\text{стац}}$  коррозии образцов производили вольтметром ВК7-9 ежедневно в течение 32 сут до установления их стационарных значений (суммарное время испытаний указано в таблице).

На контактную коррозию испытывали образцы с покрытием в сочетании с графитом, сплавом 3М и сталью 45 в синтетической морской воде средней солености, которая составляла 35 ‰. Измерение  $\Phi_{\text{стац}}$  контактных пар проводили ежедневно на протяжении 32 сут.

Графит не вызывает коррозии образцов из сплава 3М и стали 08Х18Н10Т с покрытием из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , потенциал короткозамкнутых пар совпадает с потенциалом отдельных образцов. В случае контакта напыленного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  образца из стали 45 с графитом разность потенциалов достигает критического значения —  $\Delta\Phi = 0,22$  В. Электролит через поры проникает к основе и вызывает ее усиленную коррозию. При контакте данных образцов со сталью 45 последняя выполняет роль протектора.

Контакт сплава 3М с образцами из сплава 3М не сказался на их коррозионной стойкости.

Испытания на общую коррозию проводили в лабораторных условиях в синтетической морской воде. Продолжительность испытаний и результаты периодических микроскопических исследований приведены в таблице.

На щелевую коррозию испытывали образцы типа втулка-вал в синтетической морской воде в течение 4000 ч. Втулка была изготовлена из органического стекла, зазор составлял около 0,1 мм.

В связи с отрицательным влиянием пористости на работоспособность покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на образце из стали 45 оно было пропитано анаэробным герметиком «Анатерм-1». После поляризации при комнатной температуре герметик закупоривает поры в покрытии, предотвращая тем самым проникновение агрессивной среды в материал основы (таблица).

В образцах из нержавеющей стали 08Х18Н10Т и сплава 3М с покрытием склонность к щелевой коррозии не обнаружена, а на примере образцов из стали 45 подтвердился факт общей коррозии основы под слоем покрытия.

Коррозионные испытания показали следующее: детонационное покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , нанесенное на сталь 45, из-за наличия пор не защищает ее от коррозии в морской воде; накопление продуктов коррозии основы в порах приводит к разрушению напыленного слоя;

высокую коррозионную стойкость имели образцы из стали 08Х18Н10Т и сплава 3М с покрытием из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; контакт с графитом не повлиял на кор-

розионную стойкость образцов в синтетической морской воде;

результаты испытаний на общую коррозию образцов из стали 45 с покрытием из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , пропитанных анаэробным герметиком «Анатерм-1», свидетельствовали об эффективности пропитки; коррозия материала основы из стали 45 отсутствовала.

## Выводы

1. Антифрикционные свойства и коррозионная стойкость детонационного покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обеспечивают его работоспособность в воде при удельном давлении до 5 МПа и скорости трения 0,25 м/с в однородных парах трения, а в паре с капролоном — при удельном давлении до 0,5 МПа и скорости трения 2 м/с.

2. При нанесении покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на углеродистую сталь во избежание коррозии основного металла и последующего разрушения слоя покрытия необходима пропитка слоя анаэробным герметиком или нанесение коррозионностойкого подслоя.

3. Расчет износа пары бронзовая втулка- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выполненный по результатам лабораторных антифрикционных испытаний, показал, что износ бронзы за два года эксплуатации не должен превышать 500 мкм, а напыленного покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 25 мкм при условии применения консистентной смазки типа АМС-1 в воде, что в 2–3 раза лучше, чем при использовании пары бронзовая втулка-капролон.

4. Результаты длительных испытаний подшипников валопровода с покрытием из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в паре с капролоном показали их хорошую работоспособность, а также возможность замены бронзовой облицовки на углеродистую сталь с покрытием из оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Автор выражает признательность канд. техн. наук В. Н. Гольдфайну, сотруднику ЦНИИ «Прометей» (РФ), за помощь в выполнении настоящей работы.

1. *Виноградов С. С.* Скоростной ремонт промысловых судов. — Л.: Судостроение, 1967. — 215 с.
2. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
3. *О формировании детонационно-газовых покрытий из оксида алюминия* / Ю. А. Харламов, М. И. Анисимов, В. Н. Гольдфайн и др. // Жаростойкие неорганические покрытия. — Л.: Наука, 1990. — С. 125–128.
4. *Исследование антифрикционных свойств покрытий из ВК15, нанесенного детонационным методом на сплав ВТ5* / В. Н. Гольдфайн, Е. А. Астахов, А. И. Зверев, В. Л. Лукина // Порошк. металлургия. — 1979. — № 1. — С. 81–84.
5. *Титановые сплавы в машиностроении* / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольфайн. — Л.: Машиностроение, 1977. — 194 с.
6. *Виноградов С. С., Гавриш П. И.* Износ и надежность винтурового комплекса судов. — М.: Транспорт, 1980. — 140 с.

The paper presents the results of antifriction and corrosion testing of a detonation coating of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in a similar combination and in a pair with high-tin bronze in water, including addition of lubrication, as well as after long-term comparative testing in a pair with caprolan. A satisfactory performance of samples simulating the operation of bearings of the support assembly of a rudder spindle is established.

Поступила в редакцию 08.04.2004,  
в окончательном варианте 04.06.2004