

УДК 621.001.4

DOI: 10.12737/23136

А.О. Горленко, А.Н. Ерохин

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СФЕРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассмотрена технология финишного плазменного упрочнения с нанесением многослойного нанопокрyтия системы *Si-O-C-N* применительно к упрочнению поверхностей трения сферических подшипников скольжения. Исследованы трибологические характеристики наносимого износостойкого антифрикционного покрытия, которые обу-

словливают повышение износостойкости сферических подшипников скольжения.

**Ключевые слова:** износостойкость; многослойное антифрикционное покрытие; поверхность трения; сферический подшипник скольжения; плазменное упрочнение.

А.О. Gorlenko, A.N. Yerokhin

## WEAR-RESISTANCE INCREASE IN SURFACES OF SPHERICAL SLIDING BEARINGS

A technology of plasma finishing strengthening with multi-layer nano-coating of Si-O-C-N system in the context of strengthening of friction surfaces in spherical sliding bearings is considered. The tribological characteristics of an applied wear-resistant

antifriction coating which condition on wear-resistance increase in spherical sliding bearings are investigated.

**Key words:** wear-resistance, multi-layer antifriction coating, friction surface, spherical sliding bearing, plasma strengthening.

### Введение

Одним из новых методов упрочнения поверхности, обеспечивающим нанесение износостойких тонкопленочных покрытий, является процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ), основанный на применении плазменной струи, истекающей при атмосферном давлении. Эффективность данного процесса обусловлена использованием малогабаритного и экономичного оборудования, обеспечивающего возможность нанесения упрочняющих нанопокрyтий. Данный метод относится к аддитивным технологиям.

Главным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия системы *Si-O-C-N*, взятым за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, которые вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических

реакций и образованием покрытия на изделии [1].

В качестве плазмообразующего газа применяется аргон, который обеспечивает повышенную долговечность и надежность элементов плазмотрона при длительном ведении процесса. В качестве материалов для образования покрытия используются пары летучих жидких реагентов, подача которых в реактор осуществляется специальным дозатором. Источником питания плазмотрона служит инвертор постоянного тока со специальной вольт-амперной характеристикой. Для стабильного охлаждения реактора и плазмотрона используется охладитель, изготовленный на базе холодильного агрегата. Система мониторинга процесса обеспечивает управление и контроль параметров обработки, а также определение толщины наносимого покрытия в процессе его осаждения.

### Сущность и отличительные особенности ФПУ

За рубежом в качестве основных технологий нанесения износостойких нанопокрyтий используются процессы химического (*chemical vapor deposition – CVD*) и физического (*physical vapor deposition –*

*PVD*) осаждения покрытий из газовой фазы. Покрытие в безвакуумной технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи (10...100 мм/с наносится слоями толщиной 30...3 нм [1].

Циклическое взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности при ФПУ определяет получение многослойной структуры покрытия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, полностью исключая разупрочняющий отпущок для всех сталей. Интегральная температура упрочняемых деталей при нанесении покрытия, как правило, не превышает 150°C. Формируется упрочняющее покрытие в виде прозрачной пленки, которая на полированной поверхности имеет вид интерференционной картины с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного в зависимости от толщины покрытия.

Технология финишного плазменного упрочнения объединяет положительные эффекты процессов *MO-CVD* и *PE-CVD*. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, применении более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и гибко управляемой электродуговой плазмы.

Процесс образования покрытия при ФПУ протекает в несколько стадий:

- создание устойчивого потока плазмы дугового разряда;
- испарение технологических препаратов в жидкостном питателе и перенос их паров совместно с дополнительным потоком газов в плазму дугового разряда;
- получение в плазмохимическом реакторе пароплазменного потока, содержащего атомы, положительно и отрицательно заряженные ионы и электроны;
- прохождение плазмохимических реакций в плазме дугового разряда с образованием новых соединений и их перенос плазменной струей к подложке;
- конденсация паров и продуктов реакций на подложке при касании факела плазменной струи поверхности изделия;
- взаимодействие между адсорбированными осажденными веществами и граничным слоем поверхности подложки, приводящее к зарождению и росту покрытия.

Перечисленные стадии присутствуют, как известно, и в *PVD*-процессах. Но в отличие от них при ФПУ покрытие образуется при атмосферном давлении окру-

жающей среды без применения вакуумных камер. Кроме этого, износостойкие покрытия, наносимые в вакууме методами *PVD* на подложку с температурой поверхности менее 250°C, обычно имеют пониженную адгезию.

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 150°C; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Выбор материала покрытия, наносимого методом ФПУ, определяется на основе знания механизмов изнашивания различных изделий, а также анализа имеющегося опыта применения различных соединений в качестве покрытий.

Если рассматривать принципиально любую трибосистему, работающую в условиях адгезионного, усталостного, окислительного и абразивного изнашивания, то наибольшую перспективу в качестве тонкопленочных покрытий имеют неметаллические твердые материалы: карбиды, нитриды, бориды, силициды, оксиды, композиционные материалы на их основе, керметы и алмаз [2].

При этом покрытие должно иметь максимальную адгезию, коэффициент термического расширения, близкий к коэффициенту материала упрочняемой детали, и поверхностные свойства, повышающие долговечность изделия, т.е. высокую твердость, химическую инертность, термическую стабильность, низкую теплопроводность, минимальный коэффициент трения и др.

Проведенный рентгенофазовый анализ подтверждает, что после ФПУ покрытие формируется в аморфном состоянии, при котором отсутствует дислокационная активность, и обладает высокими значениями сопротивления пластической деформации и упругого восстановления. Покрытие системы *Si-O-C-N*, нанесенное с использованием технологии ФПУ, характеризуется высокой твердостью при низком значении модуля упругости и близостью значений модуля упругости покрытия и материала основы, что объективно

должно приводить к увеличению износо-

стойкости поверхностного слоя.

### Трибологические характеристики

В качестве объекта исследований трибологических характеристик использовались сферические подшипники скольжения ШС30 (ГОСТ 3635-78, ISO 6125-82).

Упрочнению подвергались наружные сферические поверхности внутренних колец сферических подшипников скольжения ШС30, внешний вид которых представлен на рис. 1.



Рис. 1. Сферические поверхности подшипников скольжения ШС30: упрочненная ФПУ (слева) и изготовленная по заводской технологии (справа)

Заводская технология (базовый вариант) предусматривает объемную закалку внутреннего кольца сферического подшипника, изготовленного из легированной стали ШХ15, с последующей абразивной обработкой (шлифованием) сферической поверхности.

Технология ФПУ сферических поверхностей подшипников была реализована в ООО «НПФ «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург). Нанотвердость покрытия составляет 23 ГПа.

Испытания износостойкости модифицированных сферических подшипников

скольжения и изготовленных по заводской технологии проводились на разработанной и изготовленной установке на базе машины трения МИ-1М, позволяющей определять триботехнические показатели поверхностей трения сферических подшипников скольжения с применением автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) [3; 4].

Общий вид установки для испытаний износостойкости сферических подшипников скольжения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид АСНИ

План испытаний подшипников представлен в табл. 1, в которой указаны номера испытуемых подшипников, метод окончательной обработки сферической поверх-

ности трения внутреннего кольца подшипника, применяемый смазочный материал - для предварительной подготовки испытуемой поверхности и основной.

Таблица 1

План испытаний подшипников

№ подшипника	Метод окончательной обработки сферы	Смазочный материал	
		Для предварительной подготовки	Основной
1	Базовый вариант	–	Molykote BR 2 Plus
2	Базовый вариант	–	Gazpromneft Grease L
3	ФПУ	Molykote D-321R	Molykote Longterm 2 Plus
4	ФПУ	Molykote G-Rapid Plus	Molykote Longterm 2 Plus

Испытания подшипников проводились при следующих условиях: скорость относительного скольжения сферических поверхностей  $v = 0,84$  м/с (при диаметре сферических поверхностей  $d = 40$  мм и частоте вращения  $n = 400$  мин<sup>-1</sup>); нормальное усилие нагружения  $N = 2000$  Н (соответствует давлению, рассчитанном по Герцу, порядка 11 МПа); вид смазки – граничная; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – в соответствии с планом испытаний (табл. 1); общее время испытаний каждого подшипника – 6 ч.

В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор персонального компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытуемого образца [4].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись сле-

дующие показатели триботехнических свойств:

- время приработки  $t_0$ , ч, определяемое как время от начала испытания до момента выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;

- приработочный износ  $h_0$ , мкм, как величина сближения, определяемая в момент окончания времени приработки  $t_0$ ;

- значение коэффициента трения в конце испытаний  $f$ ;

-  $f_0 / f$  – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки  $f_0$  к его значению в конце испытаний  $f$ ;

- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания  $I_h = (h - h_0) / (L - L_0)$ , где  $h$  – суммарная величина износа образца за время испытаний, мкм;  $L$  – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм;  $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 t_0 v$  – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки, мкм;

- значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний  $I_{h\Sigma} = h / L$ .

Результаты трибологических испытаний подшипников представлены в табл. 2.

Следует отметить, что применяемый смазочный материал не покидает зону тре-

ния на рабочих поверхностях сферических подшипников скольжения на протяжении всего времени проведения испытаний, что обеспечивается его свойствами.

Несмотря на то что за время испытаний (процесс первоначальной приработки и нормального изнашивания) сферических подшипников скольжения изнашивается значительная величина упрочненного слоя, необходимо помнить о том, что в процессе

приработки и начального периода нормального изнашивания закладываются основные предпосылки и закономерности дальнейшего процесса трения и изнашивания данного изделия при длительной эксплуатации, что в первую очередь влияет на его износостойкость и долговечность наряду с другими имеющими место при эксплуатации факторами.

Таблица 2

Результаты испытаний сферических подшипников скольжения

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для подшипника			
		1	2	3	4
Прирабатываемость	$t_0$ , ч	2,73	2,23	2,23	2,53
	$h_0$ , мкм	15,0	14,5	2,0	2,2
	$f_0/f$	1,71	1,53	2,31	1,62
Антифрикционность	$f$	0,045	0,059	0,013	0,021
Износостойкость	$h$ , мкм	22,6	27,5	2,9	3,8
	$I_h \cdot 10^{-10}$	7,69	11,40	0,79	1,52
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	12,46	15,16	1,60	2,09

Примечание. Номера подшипников соответствуют табл. 1.

Результаты триботехнических испытаний подшипников (табл. 1) в графическом виде (интерфейс пользователя АСНИ) представлены на рис. 3 – 6.

Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия *Si-O-C-N* и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает меньшим значением коэффициента трения.

При этом сократилось время приработки и уменьшилась интенсивность изнашивания. Кривая износа покрытия *Si-O-C-N* более стабильна, и имеется тенденция к уменьшению роста скорости износа после окончания приработки. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику.

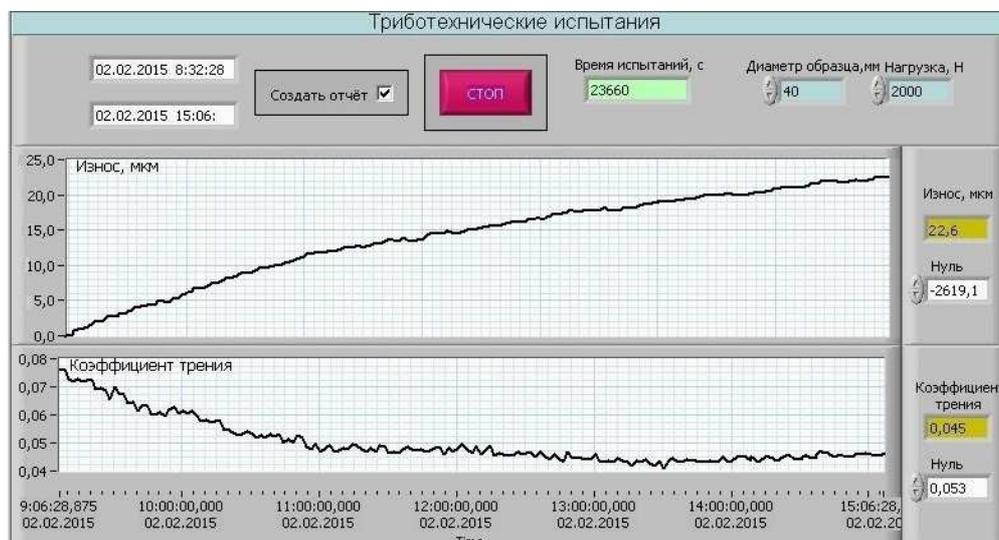


Рис. 3. Результаты испытаний сферического подшипника № 1

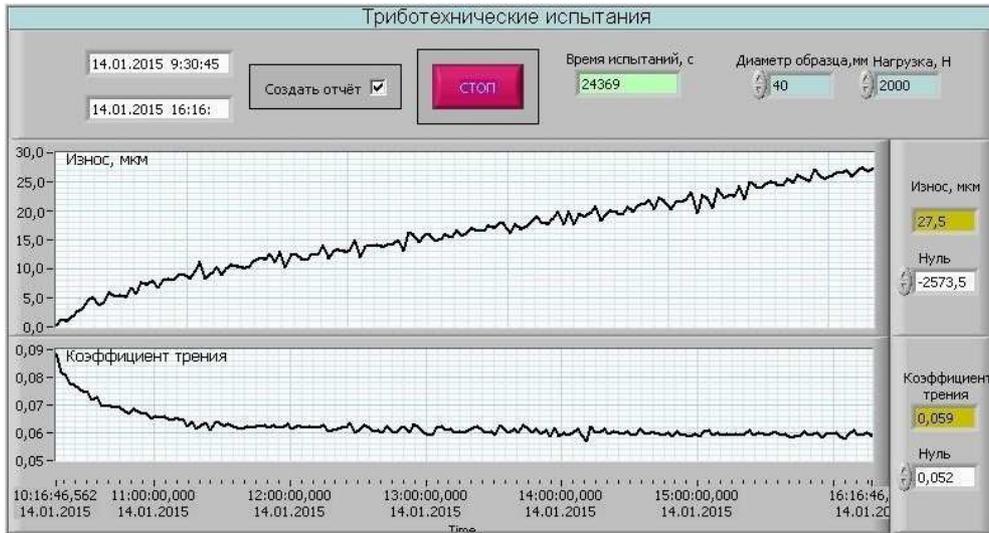


Рис. 4. Результаты испытаний сферического подшипника № 2

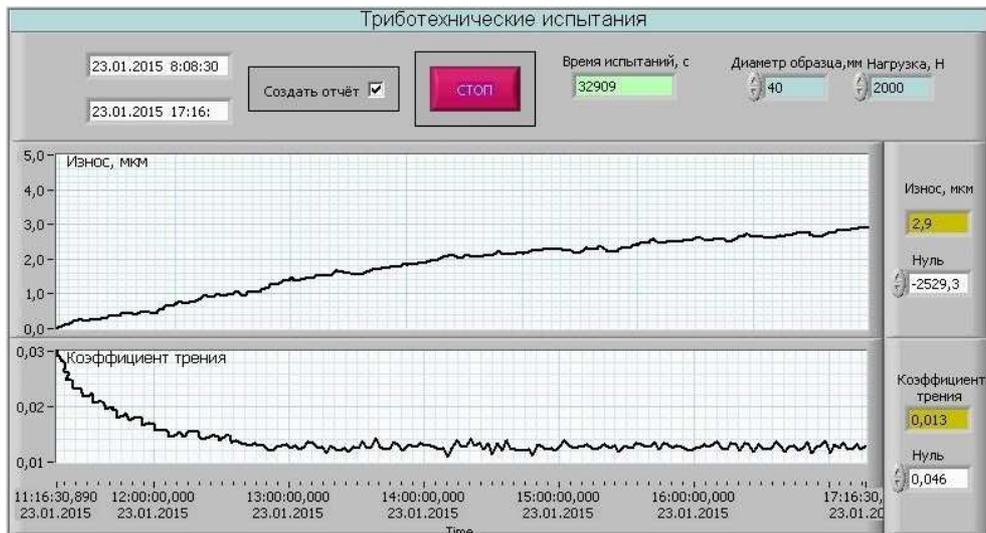


Рис. 5. Результаты испытаний сферического подшипника № 3

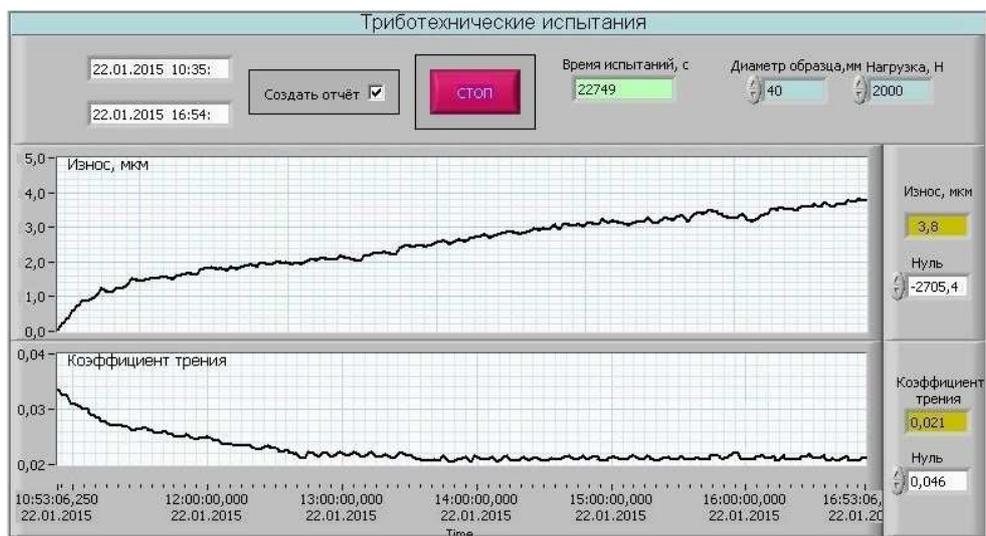


Рис. 6. Результаты испытаний сферического подшипника № 4

**Заключение**

Износостойкость сферических подшипников скольжения, обработанных методом ФПУ, повысилась по сравнению со сферическими подшипниками скольжения, изготовленными по заводской технологии, в 5...14 раз - по значениям интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания, в 6...9 раз - по значениям интенсивности изнашивания за общее время испытаний.

Коэффициент трения на рабочих поверхностях сферических подшипников

скольжения, обработанных методом ФПУ, по сравнению со сферическими подшипниками скольжения, изготовленными по базовой технологии, ниже в 2...4 раза.

Применение технологии ФПУ возможно на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления, в частности при изготовлении сферических подшипников скольжения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Горленко, А.О. Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего покрытия/ А.О.Горленко, И.Л.Шупиков, П.А.Тополянский, А.П.Тополянский// *Металлообработка*. - 2012. - № 2 (68). - С. 31-36.
2. Горленко, А.О. Обеспечение износостойкости поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия/ А.О.Горленко, В.П.Матлахов// *Вестник Брянского государственного технического университета*. - 2007. - №2. - С. 10-15.

1. Gorlenko, A.O. Modification of parts working surfaces by strengthening coating application / A.O.Gorlenko, I.L.Shupikov, P.A.Topolyansky, A.P.Topolyansky// *Metal-working*. - 2012. - № 2 (68). - pp. 31-36.
2. Gorlenko, A.O. Friction surface wear-resistance assurance by controlled technological impact/ A.O.Gorlenko, V.P.Matlahov// *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2007. - №2. - pp. 10-15.

3. Горленко, А.О. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения/ А.О.Горленко, В.П.Матлахов// *Трение и смазка в машинах и механизмах*. - 2007. - №8. - С. 1-9.
4. Горленко, А.О. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом/ А.О.Горленко, М.И.Прудников// *Справочник. Инженерный журнал*. - Прил. № 10. - 2009. - С. 22-24.

3. Gorlenko, A.O. Simulation of contact interaction and wear of cylindrical surfaces of friction/ A.O.Gorlenko, V.P.Matlahov// *Friction and Lubrication in Machinery and Mechanisms*. - 2007. - №8. - pp. 1-9.
4. Gorlenko, A.O. Tribotechnical tests of parts surfaces by normalized method/ A.O.Gorlenko, M.I.Prudnikov// *Reference Book. Engineering Journal*. - Прил. № 10. - 2009. - pp. 22-24.

*Статья поступила в редколлегию 12.09.2016.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Бишутин С.Г.*

**Сведения об авторах:**

**Горленко Александр Олегович**, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [bugi12@bk.ru](mailto:bugi12@bk.ru).

**Gorlenko Alexander Olegovich**, D.Eng., Prof. of the Dep. "Motor Transport", Bryansk State Technical University, e-mail: [bugi12@bk.ru](mailto:bugi12@bk.ru).

**Ерохин Александр Николаевич**, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [aleksanerokhin@yandex.ru](mailto:aleksanerokhin@yandex.ru).

**Yerokhin Alexander Nikolayevich**, Post graduate student of the Dep. "Motor Transport", Bryansk State Technical University, e-mail: [aleksanerokhin@yandex.ru](mailto:aleksanerokhin@yandex.ru).