

## **НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ** ГОРЛЕНКО А.О., ДАВЫДОВ С.В.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

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 обуславливают повышение износостойкости сферических подшипников скольжения.

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

The technology of finishing plasma hardening with the application of multi-layer nanocoating Si-O-C-N framework in relation to the hardening of the friction surfaces of the spherical plain bearing. Tribological characteristics of the applied wear-resistant anti-friction coating, which cause increase the wear resistance of the spherical plain bearing.

Key words: wear resistance; multi-layer anti-friction coating; the friction surface; spherical plain bearings; plasma hardening.

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 основана на использовании малогабаритного и экономичного оборудования, обеспечивающего возможность нанесения упрочняющих нанопокрyтий. Данный метод относится к аддитивным технологиям.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия на основе 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 вольтамперной 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.

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 отпуск 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. Выбор материала покрытия, наносимого методом ФПУ, определяется на основе знаний 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 и близкий коэффициент термического расширения к материалу упрочняемой детали, а его поверхностные свойства – соответствовать характеристикам, повышающим долговечность изделия, т.е. иметь 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 покрытие 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 приводит к увеличению износостойкости поверхностного слоя.

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. 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

План испытаний подшипников представлен в табл.1, в которой указаны номера испытываемых подшипников, метод окончательной обработки сферической поверхности трения внутреннего кольца подшипника, применяемый смазочный материал для предварительной подготовки испытываемой поверхности и основной.



Рис. 1. Сферические поверхности подшипников скольжения ШС30, обработанные ФПУ (слева) и изготовленные по заводской технологии (справа)



Рис. 2. Общий вид АСНИ

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 давлениям, рассчитанным 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.

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
---	-----	-----------------------	--------------------------

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 испытываемого образца [4].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств:

- время приработки  $t_0$ , ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- приработочный износ  $h_0$ , мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания 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  $h$ , мкм, – суммарная величина износа образца за время испытаний;  $L$ , мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний;  $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 \cdot t_0 \cdot u$ , мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки;
- значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний  $I_{h\Sigma} = h / L$ .

Результаты трибологических испытаний представлены в табл. 2.

Следует отметить, что применяемый смазочный материал не покидает зону трения 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.

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

Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия Si-O-C-N и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает практически в 2 раза 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 скорости роста износа после окончания приработки. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику.

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.

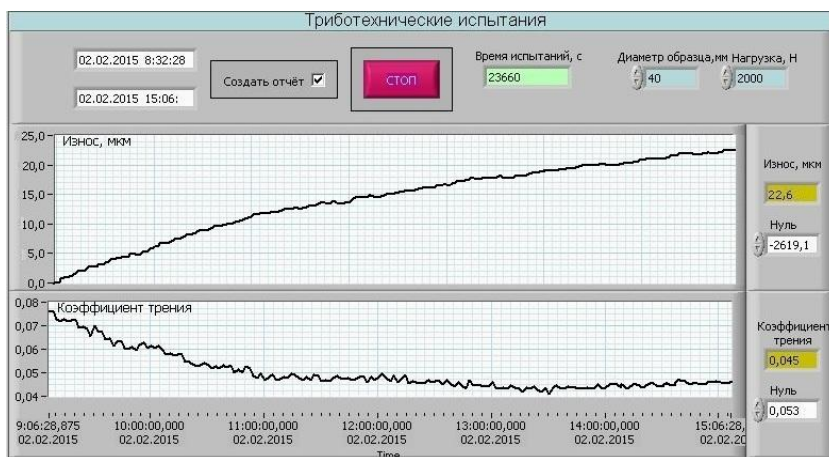


Рис. 3. Результаты испытаний сферического подшипника № 1

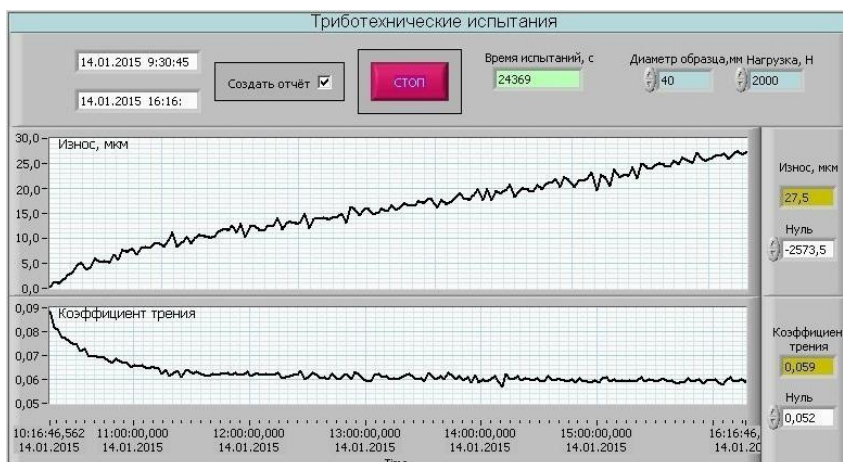


Рис. 4. Результаты испытаний сферического подшипника № 2

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.

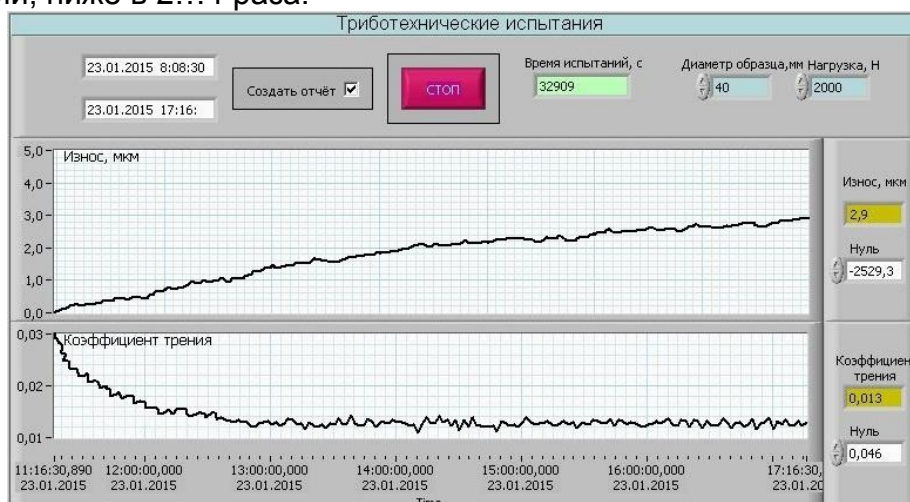


Рис. 5. Результаты испытаний сферического подшипника № 3

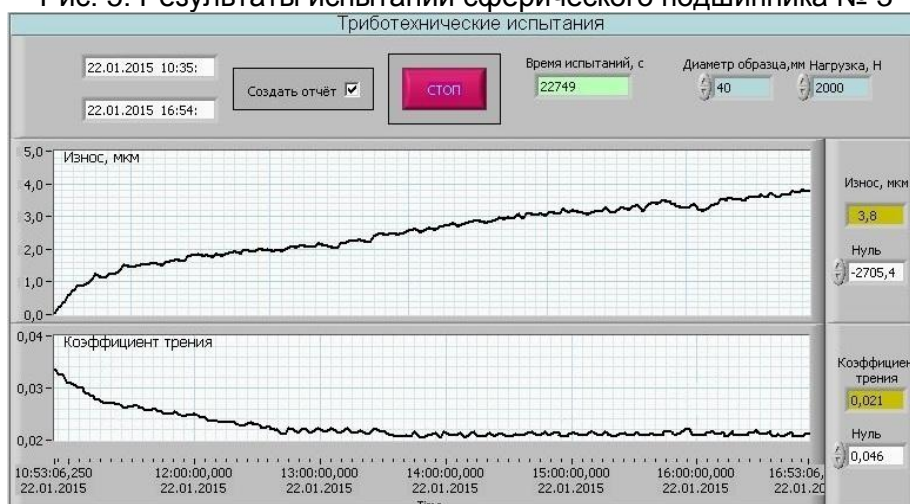


Рис. 6. Результаты испытаний сферического подшипника № 4

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.

#### Литература

1. Горленко А.О., Шупиков И.Л., Тополянский П.А., Тополянский А.П. Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего покрытия. *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 БГТУ*. – 2007. – №2. – С. 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. *Справочник*. / А.О Горленко, М.И. Прудников // *Инженерный журнал*. – Приложение № 10. – 2009. – С. 22-24