

УДК 621.001.4

**П.А. Тополянский**, канд. техн. наук

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),

**А.П. Тополянский** (ООО "Плазмацентр", Санкт-Петербург),

**С.А. Ермаков**, канд. техн. наук

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),

**А.В. Дунаев**, канд. техн. наук, **К.С. Поджарая** (ГОСНИТИ Россельхозакадемии)

## Аттестация трибологических свойств упрочняющих тонкопленочных покрытий

Рассмотрены современные подходы к трибологической аттестации технологий нанесения тонкопленочных износостойких покрытий, осаждаемых CVD- и PVD-методами, а также новой технологией финишного плазменного упрочнения – процессом бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой. Приведены особенности методологии трибоиспытаний и представлены сравнительные характеристики различных тонкопленочных покрытий. Произведен анализ влияния на их свойства отдельных факторов трибоиспытаний.

*Modern treatments of tribological certification of thin-film wear-resistant coatings deposited by CVD and PVD methods, as well as by the new finishing plasma hardening technology – by beadless plasma-chemical deposition at atmospheric pressure with the use of liquid organoelemental compounds and PECVD by cold atmospheric plasma are described. Specific features of tribological testing methods are given and comparative characteristics of different thin-film coatings are represented. Analysis of the impact of different tribological testing factors on the coatings characteristics has been conducted.*

**Ключевые слова:** модификация, PVD-процесс, CVD-процесс, финишное плазменное упрочнение инструмента, износостойкое нанопокрытие, трибологические испытания.

**Keywords:** modification, PVD-process, CVD-process, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, tribological tests.

При создании различных технических средств, имеющих трибосопряжения, с целью повышения их долговечности и надежности необходимо выбирать оптимальные материалы пар трения и оценивать их износостойкость. Эти исследования связаны с научными направ-

лениями, получившими название инженерия поверхности и трибология материалов.

Большой вклад в развитие этих научных направлений внес А.К. Зайцев (1873–1951), который почти полвека руководил созданной в 1903 г. в Санкт-Петербургском политехническом институте первой в России лабораторией трения и износа. Итогом деятельности А.К. Зайцева стало написание и издание им опять же первой в России по тематике трения и износа четырехтомной монографии "Основы учения о трении, износе и смазке машин", изданной в 1947–1948 гг. [1–4]. О мировом признании научных заслуг А.К. Зайцева говорит факт упоминания о его работах в известной монографии по трению и износу Леонарда Арчбютта и Рихарда Диллея [5], изданной в Лондоне пятым изданием в 1927 г. и переведенной в 1934 г. и в 1940 г. на русский язык [6, 7].

Основополагающие знания учения о трении и износе, разработанные А.К. Зайцевым, актуальны на современном этапе развития применительно к развиваемому в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете научному направлению – трибология покрытий.

Исходя из основных принципов трения и износа, можно предположить, что повышенная твердость поверхностного слоя является основным критерием решения задач увеличения долговечности. В действительности же при реальных условиях контакта деталей минимизация износа зависит от упругости и стойкости к деформациям поверхностного слоя не меньше, чем от твердости. Поэтому под трибологически-



ми покрытиями понимают материалы с оптимальными значениями твердости и модуля упругости и имеющие повышенные антифрикционные свойства (низкий коэффициент трения, минимальная длительность приработки, тепловыделение при трении и износ трущихся поверхностей). Дополнительно такие покрытия могут обеспечивать снижение уровня возникающих напряжений, предотвращать растрескивание, трибохимические эффекты, быть термостойкими и диэлектрическими. При этом выбор и использование современных трибологических покрытий основаны на обеспечении максимальных адгезионных характеристик с основным материалом.

Наиболее важными модельными испытаниями, предваряющими тестирование покрытий в конкретных условиях эксплуатации натуральных трибосопряжений, являются испытания на машинах трения и износа, которые основаны на получении сравнительных трибологических характеристик. Аттестация трибологических свойств тонкопленочных покрытий имеет свои особенности относительно испытаний монолитных материалов, связанные, прежде всего, с влиянием:

- физико-механических свойств поверхностного слоя стальных подложек, на которые в основном наносят покрытия (особенно твердости, равномерности фазового состава, параметров шероховатости, в том числе критериев опорной поверхности);
- технологии нанесения покрытия (температурное воздействие при нанесении покрытий может, например, обеспечивать создание демпфирующего подпленочного слоя в материале подложки, способствующего улучшению трибологических свойств; образование микрокапельной фазы на поверхности покрытия ведет к увеличению длительности приработки; неравномерность наносимого покрытия по толщине на сложнопрофильных изделиях ведет к различным условиям износа отдельных зон упрочненных поверхностей);
- толщины наносимого покрытия (во многих случаях зависимость коэффициента трения от толщины покрытия имеет экстремальный характер, свойства покрытий минимальной тол-

щины – порядка сотен нанометров – чувствительны к величине и знаку технологических остаточных напряжений на поверхности подложки, исходным параметрам шероховатости подложки);

- материала покрытия (например, многокомпонентные композиционные составы покрытий могут влиять на неравномерность, прерывистость дорожки износа за счет образования продуктов износа, влияющих на процессы трения и искажающих трибологические характеристики покрытий; покрытия одного состава, но имеющие различные адгезионно-когезионные характеристики могут иметь разные трибологические свойства);
- вида покрытия (например, покрытия одного химического состава, но являющиеся градиентными, мультислойными, нанокompозитными, имеющие различную толщину монослоя могут иметь разные трибологические характеристики).

Перечисленные особенности тонкопленочных покрытий при их сравнительной оценке практически не учитывают, поэтому приводимые в литературных источниках их трибологические свойства не являются в полной мере объективными. Усугубляется их субъективность также подчас неизвестными условиями трибоиспытаний – разными нагрузками, скоростями скольжения, материалами контртела, схемой трибоиспытаний, площадями контакта трущихся пар трения, неизвестными величинами износа контртела, различной атмосферной влажностью и температурой. При проведении трибоиспытаний также не учитывают адсорбирующую способность покрытий, наличие окисных пленок на поверхностях пар трения (особенно на контртеле).

В мировой практике экспертную оценку свойств трибосопряжений тонкопленочных покрытий оценивают на основании международных стандартов: ASTM G99-05 (2010) – "Испытания на трение и износ по схеме "шар–диск" (США), ASTM G133-05 (2010) – "Испытания на трение и износ по схеме "шар–плоскость" при поступательном движении" (США), DIN 50324–1992 – "Испытания на трение и износ



при трении скольжения по схеме "шар–диск" (Германия), JIS R 1613:2010 – "Испытания на трение и износ по схеме "шар–диск" (Япония), ISO 20808:2004 – "Определение характеристик износа и трения по схеме "шар–диск" (интернациональный стандарт).

Данные стандарты применимы для получения сравнительных трибологических характеристик как для покрытий, наносимых технологиями осаждения, напыления, наплавки и модификации поверхности, так и для проведения испытаний смазок, различных трибопрепаратов и монокристаллических материалов.

Исследования на трение и износ по схеме "шар–диск" производят на современных устройствах – трибометрах, обеспечивающих измерение коэффициента трения и износа со временем (рис. 1 на стр. 2 обл.). Данные испытания основаны на измерении тензодатчиком силы трения, возникающей при скольжении прижатого с заданным усилием сферического неподвижного контртела (шара) к вращающемуся с определенной скоростью дисковому образцу. При этом коэффициент трения скольжения определяют как отношение измеренной силы трения к усилию прижима. Важным преимуществом таких испытаний является их документальное подтверждение в виде получаемой диаграммы.

В процессе трибоиспытаний на компьютерной диаграмме выводятся кривые изменения коэффициента трения и сближения контртела с поверхностным слоем испытываемого образца (коррелирующего с износом контртела и образца). В качестве материала контртела используют шары из материалов, используемых в подшипниковой промышленности и некоторых других областях, в том числе:

- стали ШХ15 (аналоги 100Cr6, 52100), твердостью 850 HV<sub>10</sub>;
- 95X18 (аналоги X102CrMo17, 400C), твердостью 59...60 HRC;
- керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (твердостью 17 ГПа); SiC (твердостью 21 ГПа), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (твердостью 23 ГПа) и др.).

Оптимальный диаметр применяемых шаров 6 мм (возможен диаметр 3 мм). Шероховатость поверхности шаров –  $Ra \leq 0,1$  мкм. Минималь-

ная толщина испытываемых образцов (дисков) – 3 мм, оптимальный диаметр – 15...60 мм, непараллельность торцовых плоскостей дисков – не более 0,02 мм, рекомендуемый параметр шероховатости испытываемой поверхности –  $Ra \leq 0,1$  мкм.

Основные условия испытаний на трибометрах:

- прикладываемая нагрузка в зависимости от конкретного трибометра – 0,06...1,0 кН;
- линейная скорость – 0,01...50,0 мм/с;
- проведение испытаний без смазки, при граничной смазке, в условиях гидродинамического режима смазки;
- длительность испытаний – практически неограничена.

Максимальные контактные давления при испытаниях на трибометрах по теории Герца, например, при наиболее часто используемой испытательной нагрузке 1...5 Н, применяемом шаре диаметром 3 или 6 мм и получаемом контактом отпечатке диаметром 80...120 мкм, соответствуют значению 650...800 МПа.

Возможны три варианта сравнительных испытаний: шар – диск без покрытия, шар – диск с покрытием, шар с покрытием – диск с покрытием. При этом может иметь место только износ шара, износ диска и совместный износ диска и шара (рис. 2). В большинстве случаев реализуется совместный износ, поэтому отсутствие оценки износа контртела является недопустимым, что может приводить к ошибочным выводам.

В процессах трибоиспытаний диск с тонкопленочным покрытием и шар подвергают износу (рис. 3, 4), особенностями которого является

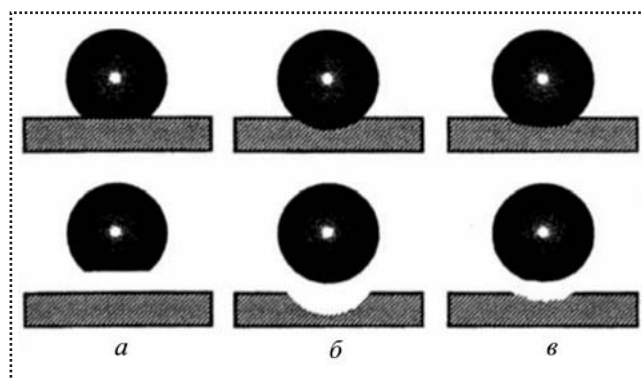


Рис. 2. Варианты износа:  
а – шара; б – диска; в – диска и шара

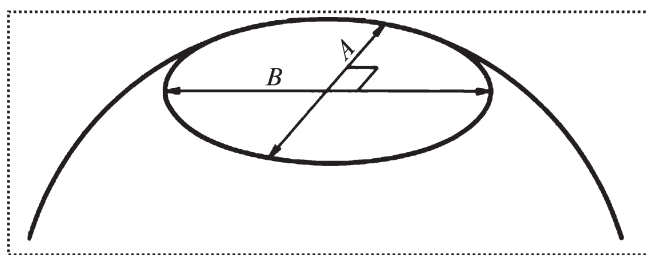


Рис. 3. Пятно износа шара:

$A$  – минимальный диаметр;  $B$  – перпендикулярный диаметр (к диаметру  $A$ )

неравномерность износа шара по перпендикулярным диаметрам образуемого пятна износа (диаметр, касающийся только покрытия, всегда меньше перпендикулярного диаметра) и неравномерность дорожки износа на испытываемом диске. Неравномерность износа по ширине и глубине дорожки особенно видны в 2D и 3D изображениях при профилометрии (рис. 5 на стр. 2 обл.). В большинстве случаев многими исследователями неравномерность износа усредняется, что приводит к ошибке минимум на 20...30 %.

Известно [1, 2], что говоря о коэффициенте трения твердых тел, определяемых в условиях трения скольжения на воздухе без смазки (сухое трение или более корректно, трение несмазанных тел), необходимо учитывать, что:

- все приводимые численные значения коэффициентов трения являются ориентировоч-

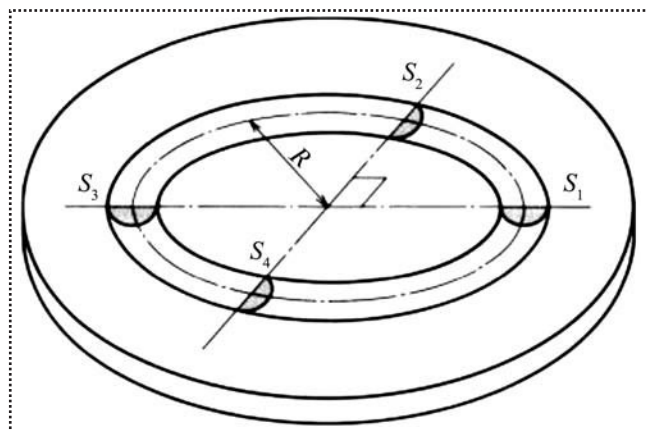


Рис. 4. Дорожка износа диска:

$R$  – радиус центра дорожки износа;  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – площади поперечного сечения профилей износа в перпендикулярных поверхностях

ными и изменяются в весьма широких пределах (от 0,1 до 0,6);

- при повышении нагрузки и скорости скольжения коэффициент трения уменьшается до выхода на катастрофический износ, когда происходит рост коэффициента трения;

- при повышении температуры (атмосферной или за счет трения) коэффициент трения растет;

- коэффициент трения зависит от шероховатости, чистоты поверхности пар трения, наличия оксидных и адсорбированных пленок влаги и газов на трущихся поверхностях, при этом снятие, например, адсорбированных пленок с поверхностей значительно повышает коэффициент трения;

- большое влияние на коэффициент трения оказывает влажность воздуха при испытаниях;

- образуемые в процессе испытаний продукты износа материала контртела и его окислов не выносятся из зоны трения и оказывают влияние на трибологические свойства пары трения;

- величины действительных площадей трения далеко не соответствуют обычно принимаемым в расчет номинальным величинам и существенно влияют на коэффициент трения.

На основании сказанного для минимизации погрешностей, которые проявляются в условиях трения несмазанных тел, приближения к реальным условиям эксплуатации трибосопряжений при определении трибологических характеристик наиболее целесообразно проводить испытания не пары трения, а триады трения: шар–смазка–диск, что приводит к получению более близких к реальности значений коэффициента трения. При этом достаточным является проведение трибоиспытаний в условиях граничной смазки, которые могут быть реализованы при капельном нанесении жидкой смазки на поверхность трения.

Важно отметить, что при граничном трении поверхности разделены очень тонкой, в несколько мономолекулярных слоев, пленкой смазки, которая существует практически всегда в виде как специально используемой смазки, так и жировых пленок (например, от рук), пыли, продуктов износа, влаги, молекул углеводородов, адсорбированных из воздуха. Более того, даже если пленка смазки толстая, все рав-



но в моменты начала и остановки движения смазка выдавливается из зоны контакта и система оказывается в режиме граничного трения.

В соответствии с международными стандартами объем изношенной поверхности контртела – шара

$$V_{\text{ш}} = \pi A^3 B / 32 D ,$$

где  $A$  – минимальный диаметр поверхности износа шара, м (см. рис. 3);

$B$  – перпендикулярный диаметр (к диаметру  $A$ ) поверхности износа шара, м;

$D$  – исходный диаметр применяемого в испытаниях шара, м.

При  $B > 1,5 A$  данная формула не применяется, а объем износа оценивается путем снятия профилограмм в двух перпендикулярных плоскостях и расчета объема износа в специальных компьютерных программах.

Удельный износ шара  $W_{\text{ш}}$ ,  $\text{м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , определяется из знания объема изношенной поверхности шара, нагрузки  $F$  и длины пути  $L$ , задаваемых при испытаниях, из следующей формулы:

$$W_{\text{ш}} = V_{\text{ш}} / (FL) .$$

Объем изношенной дорожки испытываемого образца

$$V_{\text{д}} = \pi R(S_1 + S_2 + S_3 + S_4) / 4 ,$$

где  $R$  – радиус центра окружности, устанавливаемый на трибометре в начале испытаний, м;

$S_1$ – $S_4$  – рассчитанные площади четырех перпендикулярных сечений дорожки износа (профиль измеряется на профилометре, площадь – по специальным компьютерным программам).

Удельный износ образца с покрытием,  $\text{м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , рассчитывают по формуле

$$W_{\text{покр}} = V_{\text{д}} / (FL) .$$

Теоретические варианты изменения коэффициента трения в зависимости от длительно-

сти испытаний могут иметь различный вид (рис. 6,  $a$ – $z$ ), при этом с точки зрения эффективности использования трибосопряжения наиболее предпочтительными являются варианты с падающей (рис. 6,  $b$ ) или первоначально возрастающей, а затем падающей (рис. 6,  $z$ ) характеристиками [8].

В качестве основных технологий нанесения износостойких тонкопленочных покрытий используют процессы химического (CVD – chemical vapor deposition) и физического осаждения из газовой фазы (PVD – physical vapor deposition). При CVD и PVD процессах в основном наносят покрытия, состоящие из различных тугоплавких соединений (TiN, TiCN, TiAlN, ZrN, ZrCN, ZrHfN, CrN, CrMoN и др.). Свойства данных покрытий достаточно широко изучены, а сами покрытия активно применяют в промышленности.

Одновременно в мировой практике используют многокомпонентные и композитные нанопокртия, уникальность которых заключается в высокой объемной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллов, возможности изменения соотношения объемных долей кристаллической и аморфной фаз, взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов. Это обеспечивает улучшенные физико-механические свойства покрытий, такие как твердость, упругость, усталостная прочность, жаро- и коррозионная стойкость. Кроме того, данные покрытия имеют повышенные трибологические характеристики.

К нанопокртиям относят как однослойные покрытия большой толщины, так и многослойные покрытия, имеющие нанокристаллическое строение. Особый интерес представляют аморфные покрытия, которые формально представляют предельный случай нанокристаллических материалов, соответствующий уменьше-

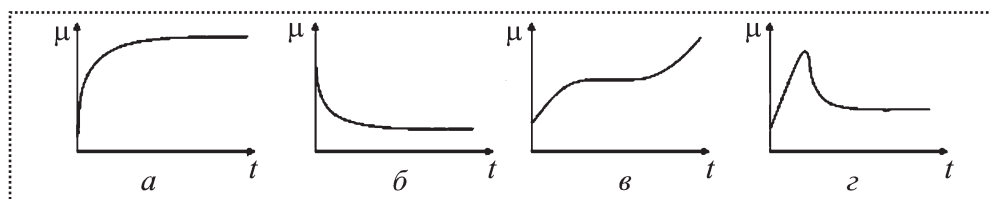


Рис. 6. Варианты изменения коэффициента трения  $\mu$  со временем



нию размера кристаллических зерен до атомарного.

С целью нанесения аморфных тонкопленочных покрытий разработана специальная технология бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (PECVD by cold atmospheric plasma) [9]. Ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы. В связи с тем, что нанесение тонкопленочных износостойких покрытий на изделия происходит на заключительной стадии их изготовления или непосредственно перед их использованием, данный процесс назван финишным плазменным упрочнением – ФПУ (рис. 7 на стр. 2 обл.). В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ используют плазменную струю, истекающую при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, дополненного плазмохимическим реактором.

К основным достоинствам ФПУ относят:

- осуществление процесса без вакуума и камер;
- минимальный нагрев изделий, не превышающий 200 °С;
- возможность нанесения покрытий локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов;
- использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия, например, на основе системы Si–O–C–N, взятой за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, которые вводят в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканирова-

нии плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны.

Важной отличительной особенностью процесса ФПУ является также то, что нанесение покрытия может осуществляться многослойно при толщине каждого слоя порядка 2...20 нм полосами шириной 8...15 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3...150 мм/с.

Проведем анализ трибологических свойств покрытий TiN, TiAlN и MoCrN толщиной 3 мкм, наносимых методом PVD на модернизированной установке ННВ-6,6-И1 с дополнительной сепарацией плазменного потока, а также аморфного покрытия системы Si–O–C–N толщиной 1 мкм, осаждаемого методом финишного плазменного упрочнения на установке ТЕСИС-115.

В качестве образцов использовали диски диаметром 15 и 30 мм, толщиной 5 мм, изготовленные из инструментальных сталей Р6М5, штамповой стали Х12М и подшипниковой стали ШХ15, прошедшие термическую обработку до твердости 60...62 HRC. Все образцы прошли окончательную операцию шлифования до параметра шероховатости  $Ra = 0,2$  мкм.

Трибологические испытания покрытий и материала основы проводили с использованием трибометра TRB-S-DE ("CSM-Instruments", Швейцария) по схеме "ball-on-disk" ("шар-диск") с использованием шаров диаметром 3 мм, изготовленных из стали ШХ15 (100Cr6) и керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

После каждого испытания производили замер износа шара. Новые испытания проводили при соприкосновении с изначальным (неизношенным) диаметром шара.

Нагрузка на контртело составляла 5, 10 и 20 Н. Линейная скорость скольжения – 10 см/с. Путь трения – 80...100 м. При испытаниях применяли моторное масло Nissan SAE 5W-40. При изменении испытательной нагрузки использовали различные диаметры кольцевой дорожки одного и того же образца.



Ширину следа износа после трибоиспытаний определяли на инвертированном металлографическом микроскопе Olympus GX 51. Профилограммы дорожки износа снимали при помощи профилометра Perthometer S2 ("Mahr GmbH", Германия). Для нахождения площади четырех перпендикулярных сечений дорожки износа профилограммы обрабатывали в специальной компьютерной программе. Все испытания проводили при температуре окружающего воздуха 21 °С, относительной влажности 57 % и атмосферном давлении 98,6 кПа.

Предваряя сравнительные оценки трибологических свойств различных покрытий, рассмотрим ряд исследований, подтверждающих важность учета влияния отдельных факторов (которые порой не оговариваются при указании значений коэффициента трения) применительно к вышеперечисленным условиям трибоиспытаний покрытия системы Si–O–C–N, нанесенного методом ФПУ.

Изменение во времени коэффициента трения покрытия при использовании различных материалов контртела – шаров из стали ШХ15 (100Cr6) и керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> показаны на рис. 8.

Из анализа диаграмм видно не только количественное отличие значений среднего значения коэффициента трения: 0,062 (с шаром из стали ШХ15) и 0,01 (с шаром из керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), но и различный качественный характер кри-

вой изменения коэффициента трения – в первом случае ее рост, во втором – падение. Сравнительная оценка данных диаграмм показывает важность оптимального выбора материала контртела.

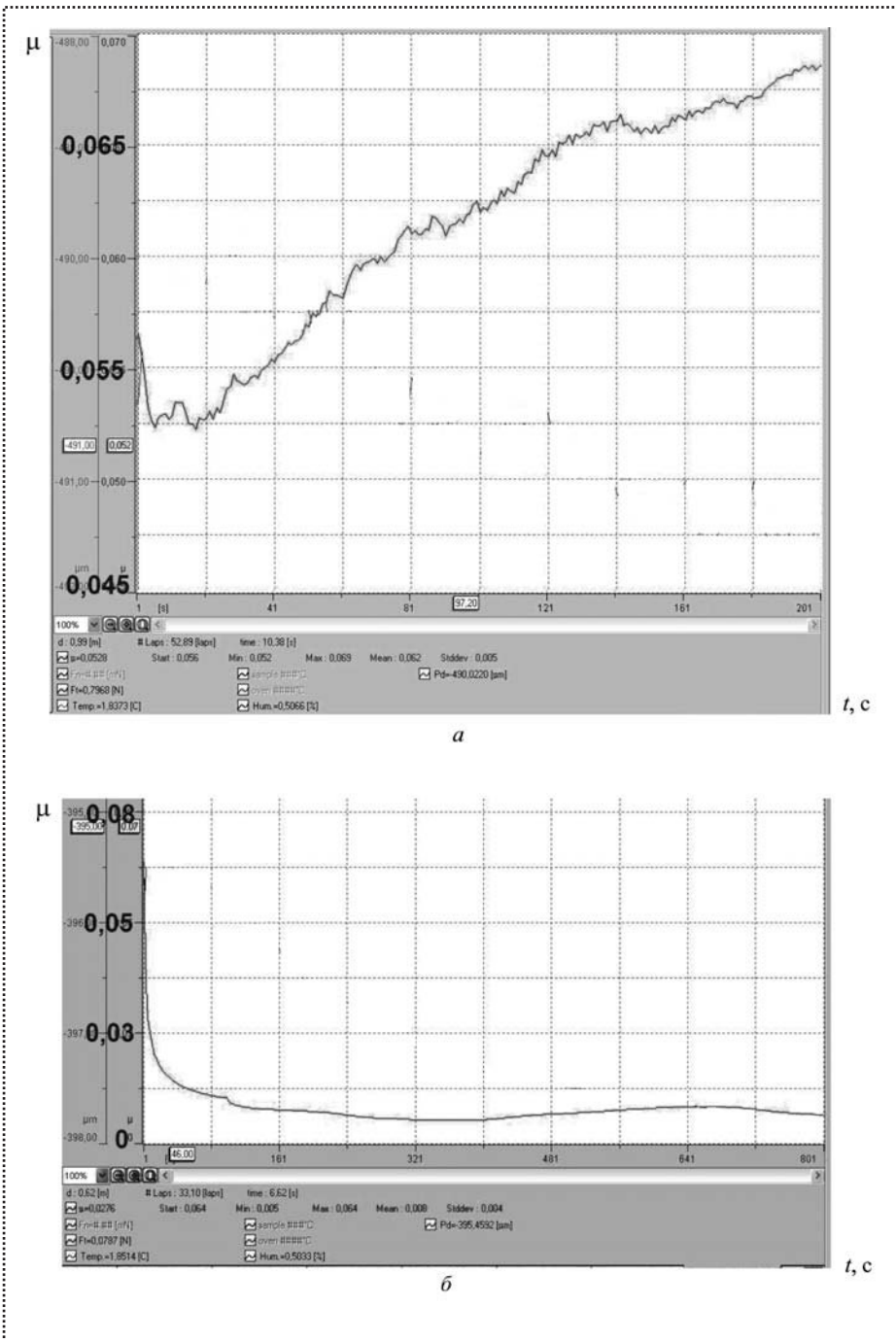


Рис. 8. Изменение коэффициента трения покрытия системы Si–O–C–N в зависимости от длительности испытаний при истирании: а – шаром из стали ШХ15 (100Cr6); б – шаром из нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

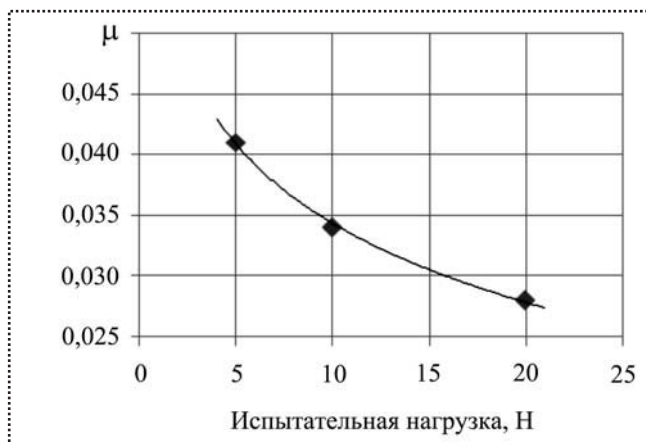


Рис. 9. Изменение коэффициента трения покрытия системы Si-O-C-N в зависимости от испытательной нагрузки

Применение различной испытательной нагрузки – 5, 10 и 20 Н при использовании контртела из керамики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  характеризует изменение коэффициента трения в пределах 20 % (рис. 9). Конкретизация нагрузки при трибоиспытаниях позволит более точно проводить сравнение трибологических характеристик покрытий.

Влияние содержания кремния в покрытии системы Si-O-C-N на изменение коэффициента трения при трибоиспытаниях с использованием контртела из керамики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  показано на рис. 10. Измерение содержания кремния в покрытии проводили с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра "Thermo Scientific Niton XL3t Gold+XRF Analyzer" (США). Изменение содержания кремния в покрытии возможно, например, при отклонениях параметров его нанесения (тока дуги, расхода плазмообразующего газа) от оптималь-

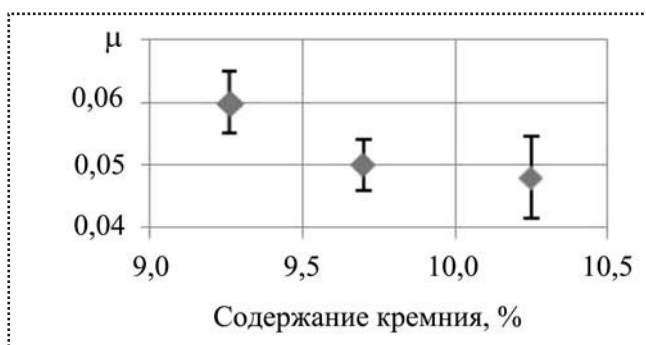


Рис. 10. Влияние содержания кремния в покрытии системы Si-O-C-N на коэффициент трения

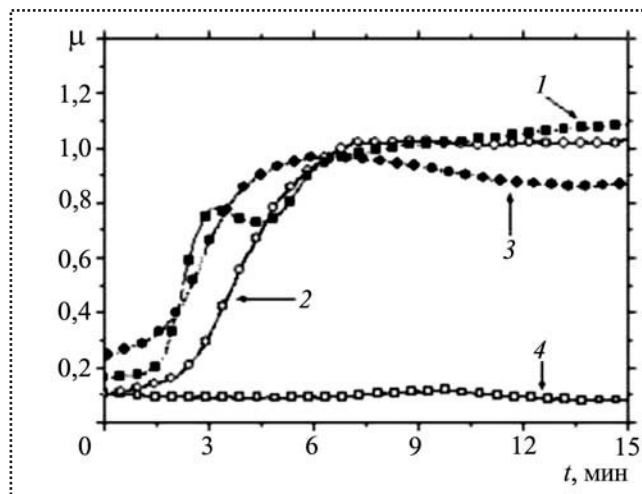


Рис. 11. Изменение коэффициента трения со временем в зависимости от содержания кремния в покрытии ZrSiN [8]: 1 – 0; 2 – 3,3; 3 – 4,9; 4 – 7,6 %

ного режима. Зависимость влияния содержания кремния в покрытии на коэффициент трения наблюдается также и с покрытием ZrSiN, наносимым методом PVD (рис. 11) [8]. Таким образом, один и тот же химический состав покрытия, указываемый различными авторами, в зависимости от содержания отдельных элементов может оказывать влияние на значение коэффициента трения.

На коэффициент трения покрытия системы Si-O-C-N (общей толщиной 1 мкм) при использовании контртела из керамики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  оказывает влияние толщина монослоя, соответствующая различному числу слоев в покрытии или числу проходов при нанесении покрытия (рис. 12).

На рис. 13 приведены зависимости, характеризующие влияние на коэффициент трения по-

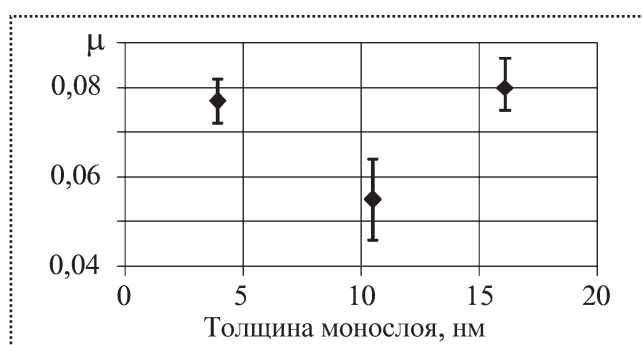


Рис. 12. Влияние толщины монослоя покрытия системы Si-O-C-N на коэффициент трения



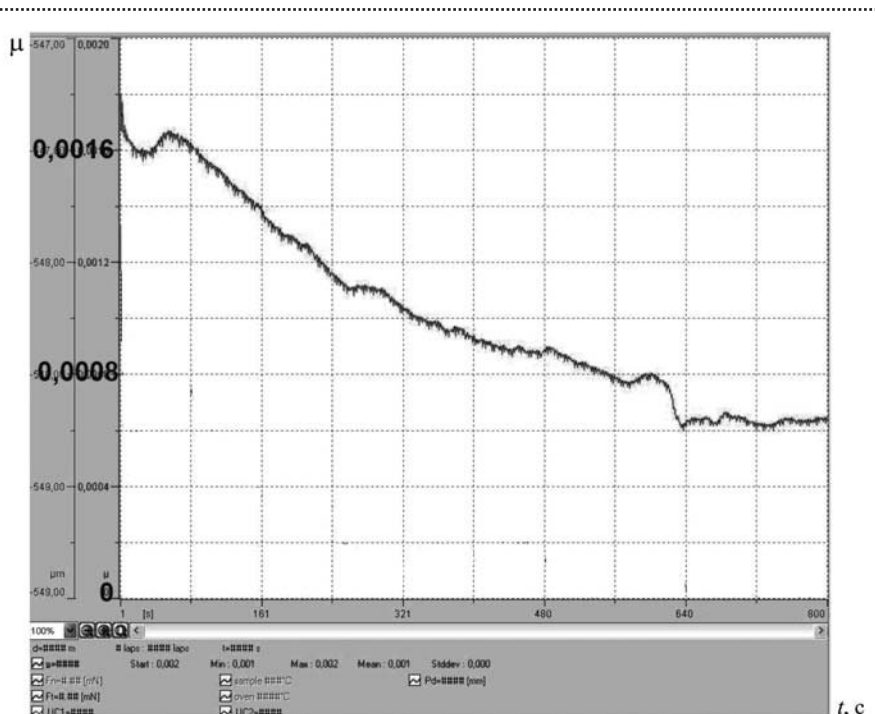


крытия системы Si–O–C–N толщиной 1 мкм при использовании контртела из керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, нанесенного на различный материал подложки – стали X12M, P6M5 и ШХ15.

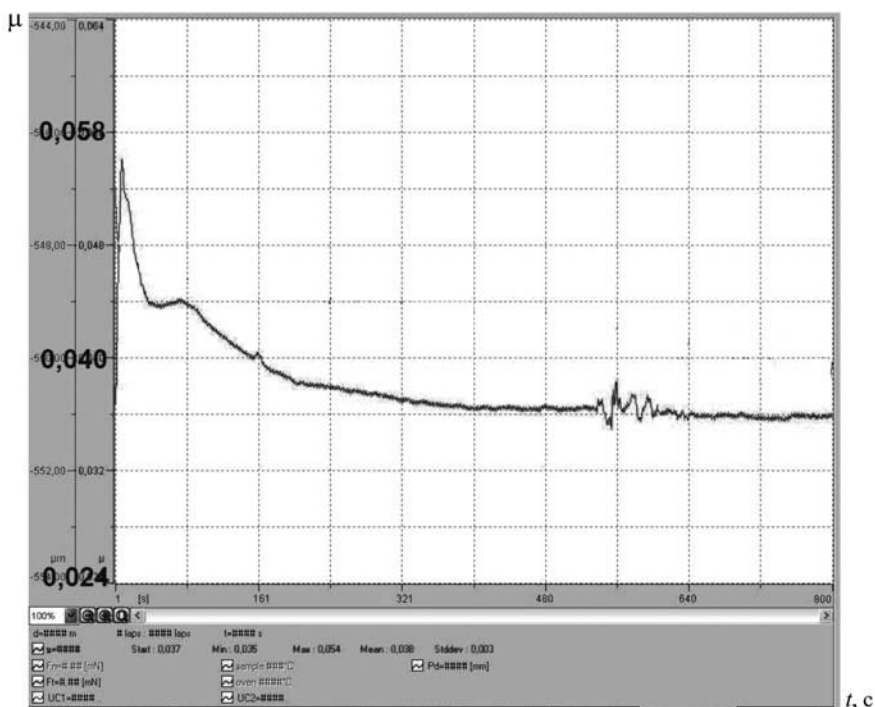
По результатам данных испытаний были получены средние коэффициенты трения в зависимости от материала подложки: 0,001 (X12M), 0,038 (P6M5), 0,024 (ШХ15), при этом имеет место одинаковый падающий характер изменения коэффициента трения. Различные значения коэффициентов трения одного и того же покрытия связаны с разными физико-механическими свойствами исходного материала. Несоблюдение идентичности исходных материалов по параметрам нанотвердости, модуля упругости, теплопроводности, по адгезионным характеристикам (замеренным по EN 1071–2,3 Scratch test или по стандарту VDI 3198/1991) и параметрам шероховатости (по международным стандартам ISO 4287:1997 и ISO 13565-2:1996) ведет к резкой субъективности полученных коэффициентов трения.

Результаты сравнительных трибологических испытаний по приведенной методике материала подложки – стали P18 и покрытий TiN, TiAlN, MoCrN и Si–O–C–N, нанесенных на сталь P18, представлены в таблице.

Анализ данных свойств покрытий показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы Si–O–C–N и он



а



б

Рис. 13. Изменение коэффициента трения со временем покрытия системы Si–O–C–N, нанесенного на различные материалы подложки из стали: а – X12M; б – P6M5; в – ШХ15

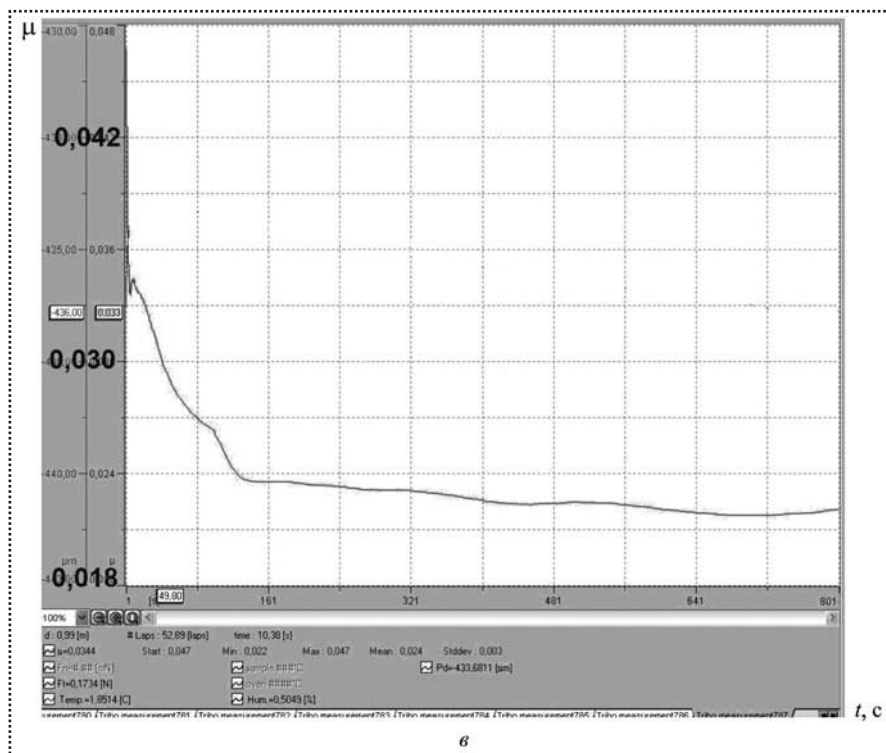


Рис. 13. Окончание

### Параметры трибоиспытаний материала основы (сталь P18) и различных покрытий

| Покрытие  | Средний коэффициент трения | Износ образца с покрытием, $10^{-10} \text{ м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ | Износ контртела, $10^{-14} \text{ м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ |
|-----------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Сталь P18 | 0,20                       | 103,0                                                                     | 5                                                               |
| TiN       | 0,10                       | 6,8                                                                       | 7                                                               |
| TiAlN     | 0,09                       | 5,5                                                                       | 6                                                               |
| MoCrN     | 0,08                       | 11,0                                                                      | 4                                                               |
| Si-O-C-N  | 0,04                       | 5,0                                                                       | 4                                                               |

примерно в 2 раза меньше коэффициента трения рассматриваемых покрытий, наносимых методом PVD и в 5 раз меньше, чем коэффициент трения материала основы. Факторами обоснования высоких трибологических свойств покрытия Si-O-C-N являются его более высокие ин-

декс пластичности, химическая инертность и термоустойчивость [9].

### Выводы

1. Проведение независимых экспертиз при сравнительных испытаниях тонкопленочных трибологических покрытий возможно только при соблюдении жестких требований к физико-механическим свойствам материала подложки и постоянства условий испытаний.

2. Сравнительные испытания различных покрытий, наносимых CVD и PVD методами, показали преимущество трибологических характеристик покрытия системы Si-O-C-N, наносимого при финишном плазменном упрочнении.

### Библиографический список

1. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. 1. Трение в машинах. Теория, расчет и конструкция подшипников и подпятников скольжения. М.-Л.: Машгиз, 1947. 256 с.
2. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. 2. Износ материалов. Классификация видов износа, методов и машин для лабораторного испытания материалов на износ машины и производственные на них исследования. М.-Л.: Машгиз, 1947. 220 с.
3. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. 3. Износ машин. Износ машин и деталей и способы борьбы с их износом. М.-Л.: Машгиз, 1947. 164 с.
4. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. 4. Смазка машин. М.-Л.: Машгиз, 1948. 279 с.
5. Archbutt L., Deeley R.M. Lubrication and lubricants. London, 1927.
6. Арчбютт Л., Дилей Р.М. Трение, смазка и смазочные материалы. Руководство по теории и практике смазки и по методам испытания смазочных материалов. Л.: Госгоргеолнефтиздат, 1934. 703 с.
7. Арчбютт Л., Дилей Р.М. Трение, смазка и смазочные материалы. 2-е изд., перераб. и доп. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940. 824 с.
8. Takadom J. Materials and surface engineering in tribology. London, 2008.
9. Topoljanskiy P., Sosnin N., Ermakow S. Finish-plasmaverfestigung bringt standzeitverlängerung von pressformen und werkzeugen // Keramische zeitschrift. 1996. № 48 (3). S. 206–207.
10. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 406 с.

Контактные координаты автора

Тополянский Павел Абрамович – e-mail: info@plasmacentre.ru