

ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА МИКРОАБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Микроабразивное изнашивание – это процесс разрушения деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения, при наличии в контакте трущихся поверхностей незакреплённых абразивных частиц с размером менее 100 мкм и твёрдостью, большей твёрдости материалов трибосопряжений. Данный вид изнашивания испытывают, например, открытые подшипники скольжения, направляющие станков, шестерни открытых передач и редукторов, шарнирные соединения цепей различных машин и т. п. Кроме этого, в связи с образованием продуктов износа, участвующих в процессах трения, возможности коксования масла, попадания абразивных частиц в смазку при нарушении герметичности смазочной системы, практически все поверхностные слои трибосопряжений также находятся под воздействием микроабразивного изнашивания.

Изучение этого вида изнашивания является актуальным для деталей и инструмента с износостойкими тонкоплёночными покрытиями, осаждаемыми с использованием PVD и CVD процессов, при выборе оптимального технологического режима нанесения одного и того же материала покрытия и при исследовании влияния химического состава, вида и физико-механических свойств различных покрытий. Для испытаний на микроабразивное изнашивание таких покрытий разработан международный стандарт EN 1071-6:2007. За рубежом данный вид испытаний является наиболее часто используемым для оценки трибологических свойств покрытий, наряду с процессами индентирования и испытаниями на трение [1].

Определение параметров износа в условиях микроабразивного изнашивания основано на микроскопическом измерении отпечатка, полученного при точечном контакте двух сопряжённых тел – свободно вращающегося стального шара и неподвижного плоского образца с покрытием (или без покрытия) при наличии в зоне трения абразивосодержащей суспензии. Необходимым условием измерений является чёткое изображение отпечатка износа и контраста покрытия и подложки,

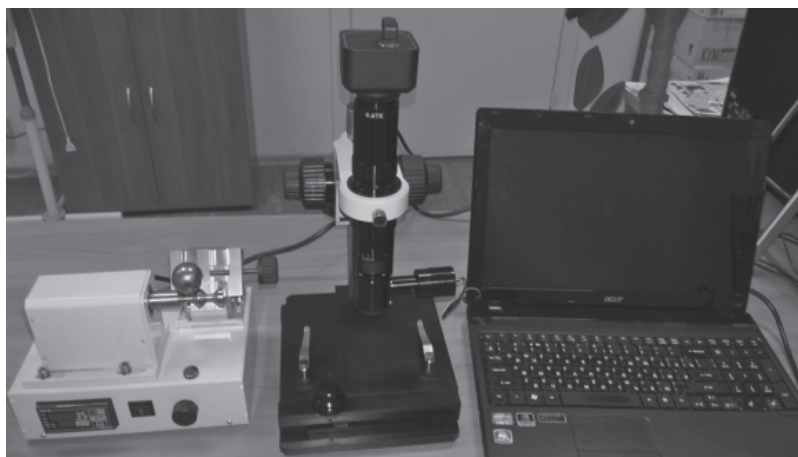


Рис. 1. Общий вид оборудования для испытаний на микроабразивное изнашивание.



Рис. 2. Вид триботестера после установки шара.

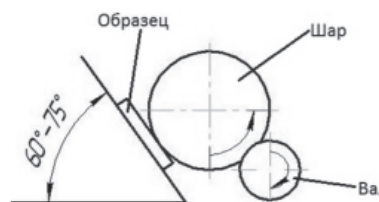


Рис. 3. Схема расположения образца относительно шара и приводного вала.

определяемые шероховатостью образца с покрытием. Испытания осуществляются в условиях наклонного расположения образца и прижатия к нему шара за счёт собственной массы. Наличие определённого количества абразивосодержащей суспензии в зоне трения шара с образцом обеспечивает быстрое получение отпечатка с износом покрытия и подложки. Нагрузка в зоне контактного трения является постоянной величиной при использовании одинаковых шаров (размеров, параметров шероховатости и материала) и их позиционирования относительно испытуемого образца. Условия износа образцов являются одинаковыми при постоянстве шаров, скорости вращения приводного вала, времени испытаний, использования одной и той же абразивосодержащей суспензии и постоянного количества или скорости её ввода.

Принцип микроабразивного изнашивания состоит в воздействии когезионно-прочных абразивных частиц микронного размера, содержащихся

в абразивосодержащей суспензии, которые находятся в зазоре между двумя поверхностями в процессе трения. При этом они производят резание контактирующих поверхностей, действуя как абразивный инструмент. В условиях вращения шара с большим диаметром относительно неподвижного образца с покрытием абразивные частицы удаляют с испытываемого образца выступы шероховатости и само покрытие на точечной поверхности, полируя и выглаживая её, с образованием сферического сегмента износа.

Оборудование для определения параметров износа с использованием испытаний на микроабразивное изнашивание состоит из триботестера Tribotester PC102 (изготовитель ООО «Плазмацентр») с комплектом шаров, микроскопа, компьютера, эталонной меры малой длины, соединительных проводов и программного обеспечения (рис. 1 - 3).

Триботестер предназначен для осуществления позиционирования шара и его вращения с заданной скоростью

относительно установленного образца с покрытием (или без него) в течение заданного времени испытаний, а также для возможности переустановки образца с целью его замены или получения нового отпечатка на заданной поверхности. Основными элементами триботестера являются: основание с панелью управления, устройство крепления приводного вала, регулируемый предметный стол с тисками, электродвигатель постоянного тока, частотный преобразователь, счётчик-таймер, элементы управления. Испытываемый образец устанавливается неподвижно перпендикулярно плоскости вращения шара на опорные поверхности губок тисков. На панели управления триботестера устанавливаются два параметра – скорость вращения приводного вала и длительность испытаний.

Для визуализации зоны истирания используется микровидеомикроскоп с трансфокатором высокого разрешения, с держателем грубой и точной фокусировки, основанием, предметным столом с микроподвижками. С целью передачи изображения объекта исследования на компьютер применяется цифровая окулярная USB видеокамера. По USB-кабелю изображение передаётся с микроскопа на компьютер, где его можно рассматривать, проводить измерения, а также сохранять в виде графических файлов. На компьютере устанавливается программа визуализации микроскопического изображения и определения геометрических размеров отпечатков.

Основными (переменными, заменяемыми) компонентами испытаний являются шары и абразивосодержащая суспензия. Шары в основном используются из производства подшипников качения. Материал шаров – термообработанная сталь ШХ15, твёрдость – 60-62 HRC. Параметр шероховатости поверхности шаров $R_a = 0,1$ мкм. Диаметр шара – 30 мм. В качестве абразивосодержащей суспензии используется суспензия на водной основе с монокристаллами синтетического алмаза диаметром 1 мкм (или на основе электрокорунда). Во время проведения испытаний подача суспензии в зону трения является строго дозированной и повторяемой в заданном временном интервале.

Для измерений используются плоские образцы с покрытием, на-

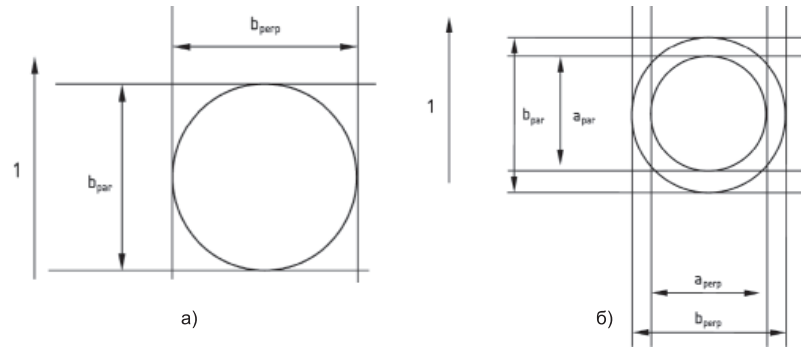


Рис. 4. Измеряемые параметры: а – для монолитного материала (подложки или толстых покрытий), б – для тонкоплёночных покрытий, где 1 – направление вращения шара.

несённым на торцевую поверхность. Размеры образцов ограничиваются размерами губок тисков триботестера – до 30 мм в ширину, до 40 мм в длину, до 10 мм в высоту. Рекомендуемый параметр шероховатости образцов с покрытием $R_a \leq 0,32$ мкм. Неплоскостность торцевых поверхностей образца не должна превышать 0,05 мкм. Рекомендуемая толщина покрытия > 1 мкм. Длительность испытаний определяется получением глубины кратера износа большего, чем толщина покрытия. Оценка параметров износа возможна также для толстых покрытий (глубина отпечатка меньше толщины покрытия) и для монолитного материала, например подложки.

Основополагающим для воспроизводимости испытаний является постоянство следующих параметров:

- угла наклона поверхности образца к горизонту (порядка 60 - 75°), оптимального расположения шара относительно приводного вала (ось приводного вала должна быть параллельна поверхности образца);
- нормальной нагрузки свободно лежащего шара к поверхности образца N [Н], определяемой расчётным путём, в зависимости от массы конкретно используемого шара, его расположения относительно приводного вала и испытываемого образца, а также коэффициентов трения между шаром с поверхностью образца и поверхностью приводного вала. Для образца, расположенного под углом 60 - 75° к горизонтальной поверхности, нормальная нагрузка стального шара диаметром $D_{шар} = 30$ мм составляет 0,25 Н;
- круговой скорости вращения вала $n_{вал}$ [об/мин];
- круговой скорости вращения шара $n_{шар}$ [об/мин], определяемой из зависимости $n_{шар} = n_{вал} \times d_{вал} / D_{шар} \cdot 1$, где

$d_{вал}$ – диаметр вала в точках касания шара, $D_{шар} \cdot 1$ – диаметр сечения шара в точках соприкосновения с валом;

- времени испытаний $t_{исп.}$ [с] (принимается на основании тестовых испытаний или знаний конкретных свойств покрытий);
- длины пути скольжения шара относительно плоскости образца $S = t_{исп.} \times n_{шар} \pi \cdot D_{шар}$, где $t_{исп.}$ – время испытаний [мин], $n_{шар}$ – круговая скорость шара [об/мин], $D_{шар}$ – диаметр шара [мм].

Основными измеряемыми параметрами на отпечатке являются: $b_{пар}$, $b_{перп}$, $a_{пар}$, $a_{перп}$ (рис. 4).

Основными расчётными параметрами при испытаниях на микроабразивное изнашивание принимаются:

- для образцов основного материала (подложки) без покрытий (образцов с покрытием при глубине отпечатка меньше толщины покрытия): объёмный износ подложки

$$V_s = \pi \frac{b^4}{64R} [\text{мм}^3]$$

или объёмный износ покрытия при глубине отпечатка меньше толщины покрытия

$$V_c = \pi \frac{b^4}{64R} [\text{мм}^3],$$

где R – радиус используемого шара, b – среднее значение диаметров отпечатка подложки $b_{пар}$ и $b_{перп}$

$$b = (b_{пар\ ср} + b_{перп\ ср}) / 2;$$

- для образцов с покрытием (глубина отпечатка больше толщины покрытия): объёмный износ покрытия

$$V_c \approx \frac{\pi}{64R} (b^4 - a^4) [\text{мм}^3],$$

объёмный износ подложки (с учётом их совместного влияния)

$$V_s \approx \frac{\pi a^4}{64R} [\text{мм}^3],$$

сумма объёмного износа покрытия и подложки $V_c + V_s$ [мм³],

где a – среднее значение диаметра покрытия $a_{\text{ираг ср}}$ и $a_{\text{иперг ср}}$
 $a = (a_{\text{ираг ср}} + a_{\text{иперг ср}}) / 2$.

Вспомогательными расчётными параметрами являются:

- коэффициент износа подложки – отношение объёмного износа подложки к длине пути скольжения и нормальной нагрузке

$$K_s = \pi \frac{b^4}{64RSN} [M^3H^{-1}M^{-1} \text{ или } MM^3/НММ],$$

где S – длина пути скольжения, N – нормальная нагрузка к поверхности образца;

- коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка меньше толщины покрытия – отношение объёмного износа подложки к длине пути скольжения и нормальной нагрузке

$$K_c = \pi \frac{b^4}{64RSN} [M^3H^{-1}M^{-1} \text{ или } MM^3/НММ];$$

- коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка больше толщины покрытия

$$K_c = \frac{1}{\frac{SN}{V_c} - \frac{1}{V_s} \cdot \frac{V_c}{K_s}} [M^3H^{-1}M^{-1} \text{ или } MM^3/НММ];$$

- скорость изнашивания подложки – отношение величины объёмного износа подложки ко времени, в течение которого возник износ,

$$W_s = V_s / t_{\text{исп}} [MM^3/c];$$

- интенсивность изнашивания подложки – отношение величины объёмного износа подложки к пути трения, на котором происходил износ,

$$I_s = V_s / S [MM^3/М];$$

- скорость изнашивания покрытия – отношение величины объёмного износа покрытия ко времени, в течение которого возник износ,

$$W_c = V_c / t_{\text{исп}} [MM^3/c];$$

- интенсивность изнашивания покрытия – отношение величины объёмного износа покрытия к пути трения, на котором происходил износ,

$$I_c = V_c / S [MM^3/М];$$

- скорость изнашивания покрытия и подложки – отношение величины суммарного объёмного износа покрытия и подложки ко времени, в течение которого возник износ,

$$W_{cs} = V_c + V_s / t_{\text{исп}} [MM^3/c];$$

- интенсивность изнашивания покрытия и подложки – отношение величины суммарного объёмного износа покрытия и подложки к пути трения, на котором происходил износ,

$$I_{cs} = V_c + V_s / S [MM^3/М].$$

Сравнительный анализ расчётных параметров производится:

Таблица 1. Результаты измерений и расчётов испытания подложки.

Измерения			Расчет				
№	$b_{\text{ираг}}$, МКМ	$b_{\text{иперг}}$, МКМ	b , МКМ	$V_s \times 10^5$, МКМ ³	$K_s \times 10^{-13}$, М ³ Н ⁻¹ М ⁻¹	$I_s \times 10^{-5}$, ММ ³ /М	$W_s \times 10^5$, МКМ ³ /с
1	654,15	654,15	681,9	7,07	8,96	22,41	0,24
2	699,59	699,59					
3	692,01	692,01					

Таблица 2. Результаты расчётов испытания покрытия MultiPateks на стали Р6М5 для средних диаметров отпечатков $a = 585$ мкм и $b = 639$ мкм.

$V_s \times 10^5$	$V_c \times 10^5$	$(V_s + V_c) \times 10^5$	$K_c \times 10^{-13}$	$I_c \times 10^{-5}$	$W_c \times 10^5$	$K_s \times 10^{-13}$	$I_s \times 10^{-5}$	$W_s \times 10^5$	$I_{cs} \times 10^{-5}$	$W_{cs} \times 10^5$
МКМ ³	МКМ ³	МКМ ³	М ³ Н ⁻¹ М ⁻¹	ММ ³ /М	МКМ ³ /с	М ³ Н ⁻¹ М ⁻¹	ММ ³ /М	МКМ ³ /с	ММ ³ /М	МКМ ³ /с
3,8	1,6	5,5	6,9	5,2	0,05	4,9	12,2	0,13	17,3	0,18

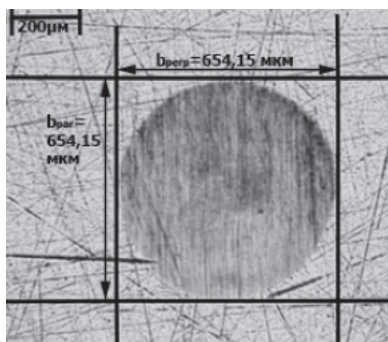


Рис. 5. Микрофотография отпечатка №1 после испытаний на микроабразивное изнашивание стали Р6М5.

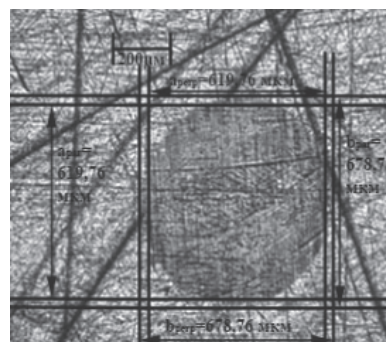


Рис. 6. Микрофотография одного из отпечатков покрытия MultiPateks на стали Р6М5 после испытаний на микроабразивное изнашивание.

- между объёмным износом подложки без покрытия (например, измеренным на обратной стороне образца с покрытием) и суммарным объёмным износом покрытия с подложкой;

- между объёмным износом одной и той же подложки (образцов из одинакового исходного материала и технологии их изготовления) с различными тонкоплёночными покрытиями (по толщине, по составам, по видам, по физико-механическим свойствам).

Покрытие, повышающее стойкость образца-подложки против микроабразивного изнашивания, должно иметь объёмный износ $V_s + V_c$ меньше, чем объёмный износ образца-подложки без покрытия V_s .

Объективность сравнительной оценки покрытий по параметрам, связанным с объёмным износом, основана на постоянстве вида трения (скольжение), силовых и кинематических параметров (давления на поверхности трения, скорости скольжения), внешних условий (температуры, влажности, вибраций) и условий проведения испытаний (постоянства контртела, абразивного материала и его количества).

На основании разработанной методики проводились испытания на микроабразивное изнашивание покрытия MultiPateks (многокомпонентное, многослойное, градиентное нанопокрывие

системы H-SiOCN), нанесённого при финишном плазменном упрочнении (ФПУ) [2], и широко применяемого покрытия TiN, осаждённого методом вакуумного ионно-плазменного напыления с сепарированием плазменного потока на модернизированной установке ННВ6.6И1. Данные покрытия наиболее широко используются для упрочнения металлорежущего инструмента. В качестве материала подложки использовалась быстрорежущая сталь Р6М5, HRC 62-64. Толщина нанесённых покрытий составляла порядка 2 - 3 мкм. Используемый процесс ФПУ – это метод повышения долговечности деталей и инструмента путём нанесения тонкоплёночных покрытий толщиной до 3 мкм с использованием технологии бескамерного химического осаждения при применении жидких элементоорганических соединений и активации электродуговой плазмой. Основными достоинствами ФПУ являются: осуществление процесса без вакуума и без применения специализированных камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200 °С; улучшение параметров шероховатости поверхностей с покрытием; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; безопасность процесса с существенно меньшей нагрузкой на окружающую среду; использование малогабаритного,

Таблица 3. Результаты расчётов испытания покрытия TiN на стали Р6М5 для средних диаметров отпечатков $a = 585$ мкм и $b = 639$ мкм.

V_s $\times 10^5$	V_c $\times 10^5$	(V_s+V_c) $\times 10^5$	K_c $\times 10^{-13}$	I_c $\times 10^{-5}$	W_c $\times 10^5$	K_s $\times 10^{-13}$	I_s 10^{-5}	W_s $\times 10^5$	I_{cs} $\times 10^{-5}$	W_{cs} $\times 10^5$
мкм ³	мкм ³	мкм ³	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	мм ³ /м	мкм ³ /с
2,2	9,81	12,01	7,61	15,54	0,16	1,39	3,49	0,04	19,03	0,2

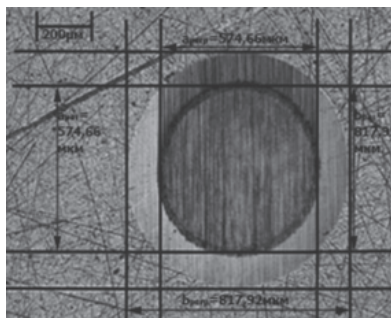


Рис. 7. Микрофотография одного из отпечатков покрытия TiN на стали Р6М5 после испытаний на микроабразивное изнашивание.

мобильного и экономичного оборудования.

Результаты испытаний для подложки без покрытия приведены в табл. 1, а на рис. 5 показан один из исследуемых отпечатков подложки. В табл. 2 и 3 приведены результаты измерений и расчётов данной подложки с нанесёнными покрытиями

MultiPateks и TiN, а на рис. 6 и 7 – микрофотографии отдельных отпечатков подложки с покрытиями MultiPateks и TiN соответственно.

Анализ проведённых исследований позволяет сделать следующие выводы:

- объёмный износ, интенсивность изнашивания и скорость изнашивания и, соответственно, коэффициент износа подложки – стали Р6М5 – после нанесения покрытий MultiPateks и TiN снизился на 50% и 70%;

- коэффициент износа покрытия MultiPateks соответствует $6,9 \text{ м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$, что меньше значения этого коэффициента для вакуумного покрытия TiN, равного $7,61 \text{ м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$, при этом диапазон измеренного последнего коэффициента сравним с полученными ранее при аналогичных испытаниях [3];

- разработанное оборудование и методика проведения испытаний на микроабразивное изнашивание позволяет оценивать трибологические характеристики поверхностных слоёв материалов различных изделий, работающих в условиях трения и износа, в частности, наиболее эффективно для контроля качества наносимых упрочняющих покрытий на металлорежущий инструмент.

П. А. Тополянский, ООО «Плазмацентр».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тополянский П. А., Тополянский А. П., Ермаков С. А., Дунаев А. В., Поджарая К. С. Аттестация трибологических свойств упрочняющих тонкоплёночных покрытий. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8, С. 20 - 29.
2. Горленко А. О., Тополянский П. А., Тополянский А. П. Трибологические возможности финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента. Металлообработка. - 2016. - № 3, - С. 33 - 41.
3. Rutherford K.L., Hutchings I.M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. Surface and Coatings Technology. - 79 (1996). - 231 - 239