

## ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА МИКРОАБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

**М**икроабразивное 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 трибосопрежжений. 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 трибосопрежжений 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,

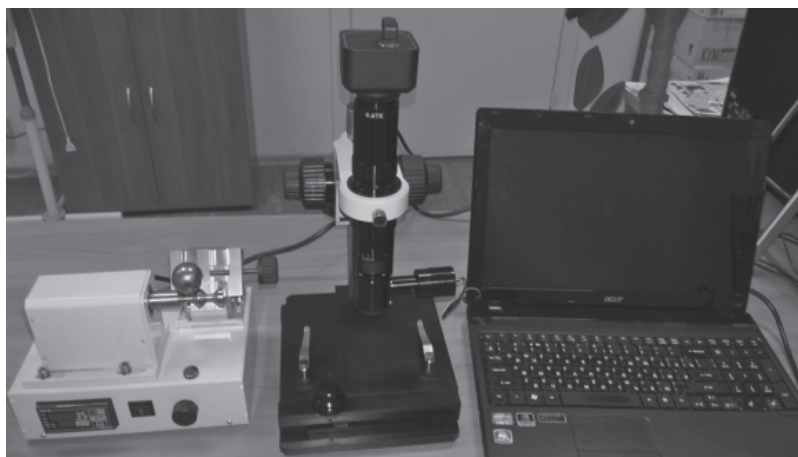


Рис. 1. Общий вид оборудования для испытаний на микроабразивное изнашивание.



Рис. 2. Вид триботестера после установки шара.

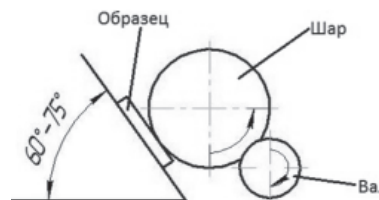


Рис. 3. Схема расположения образца относительно шара и приводного вала.

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-

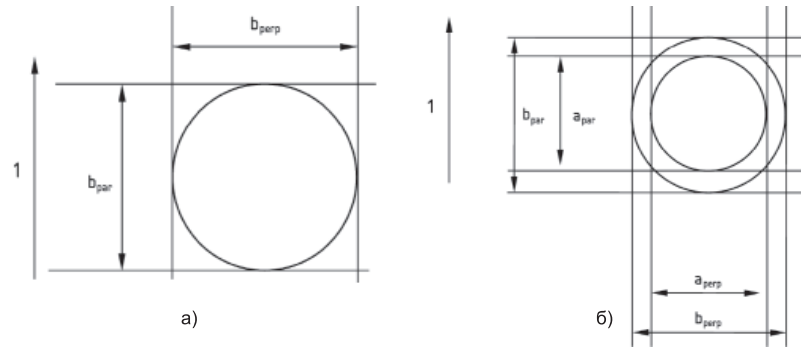


Рис. 4. Измеряемые параметры: а – для монолитного материала (подложки или толстых покрытий), б – для тонкоплёночных покрытий, где 1 – направление вращения шара.

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:  $b_{парг}$ ,  $b_{перг}$ ,  $a_{парг}$ ,  $a_{перг}$  (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  $b_{парг}$  и  $b_{перг}$

$$b = (b_{парг\ ср} + b_{перг\ ср}) / 2;$$

- 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  $V_c + V_s$  [мм<sup>3</sup>],

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

Вспомогательными расчётными параметрами являются:

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

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

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

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

- коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка больше толщины покрытия

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

- 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,

$$I_s = V_s / S [MM^3/M];$$

- 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,

$$I_c = V_c / S [MM^3/M];$$

- 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,

$$I_{cs} = V_c + V_s / S [MM^3/M].$$

Сравнительный анализ расчётных параметров производится:

Таблица 1. Результаты измерений и расчётов испытания подложки.

Измерения			Расчет				
№	$b_{\text{ираг}}$ , МКМ	$b_{\text{иперп}}$ , МКМ	$b$ , МКМ	$V_s \times 10^5$ , МКМ <sup>3</sup>	$K_s \times 10^{-13}$ , М <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> М <sup>-1</sup>	$I_s \times 10^{-5}$ , ММ <sup>3</sup> /М	$W_s \times 10^5$ , МКМ <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup>	МКМ <sup>3</sup>	МКМ <sup>3</sup>	М <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> М <sup>-1</sup>	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /с	М <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> М <sup>-1</sup>	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /с	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /с
3,8	1,6	5,5	6,9	5,2	0,05	4,9	12,2	0,13	17,3	0,18

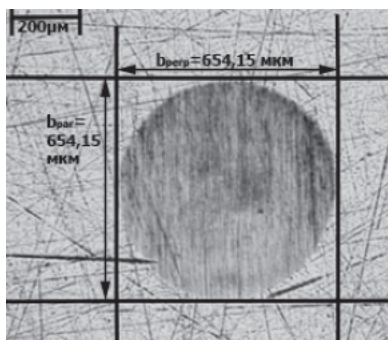


Рис. 5. Микрофотография отпечатка №1 после испытаний на микроабразивное изнашивание стали Р6М5.

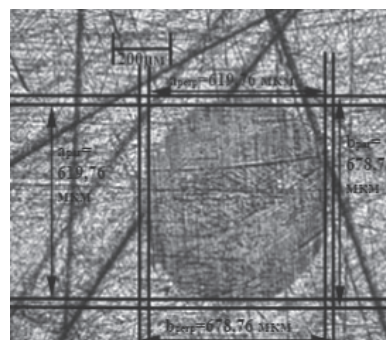


Рис. 6. Микрофотография одного из отпечатков покрытия MultiPateks на стали Р6М5 после испытаний на микроабразивное изнашивание.

- 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 составу, 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  $V_s$ .

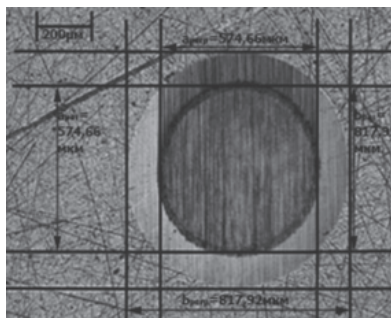
Объективность сравнительной оценки покрытий по параметрам, связанным с объёмным износом, основана на постоянстве вида трения (скольжение), силовых и кинематических параметров (давления на поверхности трения, скорости скольжения), внешних условий (температуры, влажности, вибраций) и условий проведения 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 <sup>3</sup>	МКМ <sup>3</sup>	МКМ <sup>3</sup>	М <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> М <sup>-1</sup>	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /с	М <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> М <sup>-1</sup>	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /с	ММ <sup>3</sup> /М	МКМ <sup>3</sup> /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