

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены физико-механические характеристики износостойких покрытий, приборы для их контроля и их технические характеристики.

Полный контроль качества износостойких покрытий предусматривает измерение следующих параметров:

а) толщина покрытия

Наиболее просто толщина покрытия контролируется путем «протирания» сферических лунок с заглаблением в подложку малоизнашиваемого криволинейного контртела, обычно шара, с участием абразива. Последующее измерение хорды лунок позволяет рассчитать толщину покрытия исходя, например, из расчетной схемы «шар-плоскость» (рис. 1).

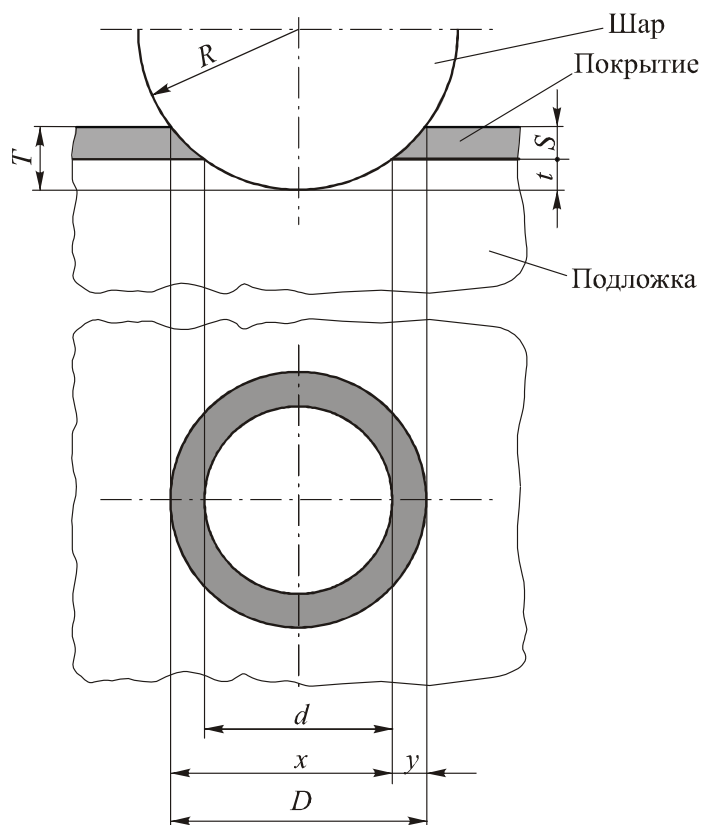


Рис. 1. Расчетная схема для определения толщины покрытия
(модель «шар-плоскость»)

Здесь толщина покрытия

$$S = T - t,$$

где T – общая глубина сферической лунки; t – глубина лунки в подложке.

Общая глубина лунки

$$T = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - D^2} \right),$$

а глубина лунки в подложке

$$t = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d^2} \right).$$

Тогда толщина покрытия

$$S = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2} \right).$$

У тонких покрытий, когда $T \ll R$ последнее уравнение принимает вид:

$$S = \frac{D^2 - d^2}{8R},$$

или заменив $D = x + y$ и $d = x - y$

$$S = \frac{xy}{2R}.$$

Для контроля толщины покрытий рассмотренным методом обычно используют прибор *Calotest* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария). Он позволяет измерять одно- и многослойные покрытия толщиной 0,1...50 мкм в течение нескольких минут. Для этого прибор оснащен микроскопом, цветной видеокамерой и программным обеспечением для анализа изображения.

б) твердость и модуль упругости покрытия

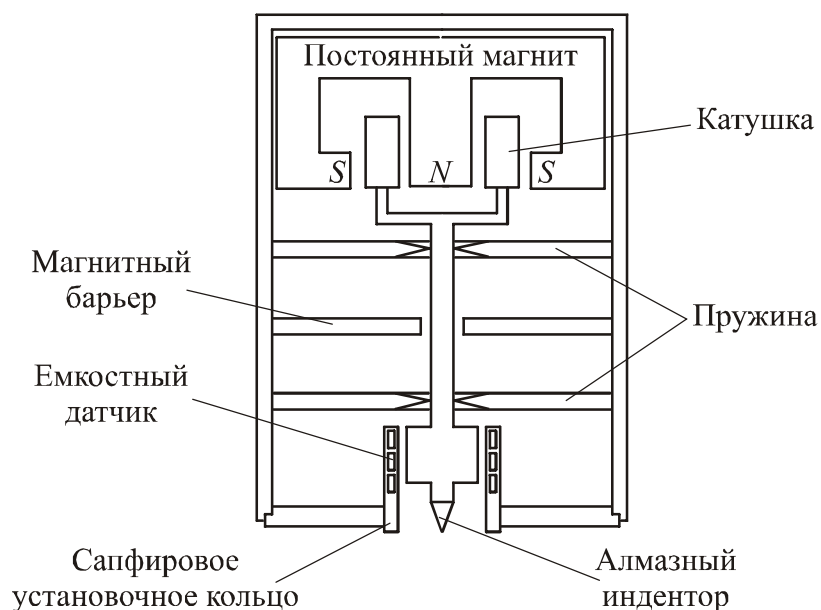


Рис. 2. Схема измерительной головки нанотвердомера
Nano-Hardness Tester фирмы *GSM Instruments*

Для этой цели используют, например, нанотвердомер *Nano-Hardness Tester* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария) (рис. 2) [1]. Прибор состоит из прецизионного твердомера, оптического микроскопа и предметного столика с механическим приводом. Образец с плоско-параллельными поверхностями – опорной и изучаемой, размером не менее 6 мм помещают на предметный столик и с помощью оптического микроскопа выбирают место для индентирования.

Перемещения предметного столика в горизонтальной плоскости (позиционирование) и индентора в вертикальной плоскости (измерения) управляются персональным компьютером с использованием программного обеспечения фирмы *GSM* с очень высокой точностью (табл. 1).

1. Основные технические характеристики нанотвердомера *Nano-Hardness Tester* фирмы *GSM Instruments*

Технические характеристики	Значения
Нагрузка, МН	0,1...300,0

Глубина проникновения, мкм	0,03...500
Погрешность вертикального позиционирования индентора, мкм	0,0003
Шаг горизонтального позиционирования предметного столика, мкм	1,0

При измерении твердости на поверхность образца опускается сапфировое кольцо внутренним диаметром 5 мм, а затем вдавливается индентор (см.рис. 2). Такая схема позволяет термостатировать область измерения, устранить возможный изгиб тонких образцов при нагружении, а по моменту касания кольца оценить расстояние от базового наложения индентора до поверхности образца.

Из схемы измерительной головки видно, что нормальная нагрузка передается индентору через вертикальный стержень, являющийся сердечником прецизионного электромагнита, закрепленного мембранными пружинами. Перемещение стержня относительно сапфирового кольца измеряется высокочувствительным емкостным датчиком, который связан с персональным компьютером. Инденторами являются алмазные четырех– или трехгранные пирамиды соответственно Виккерса или Берковича (рис. 3).

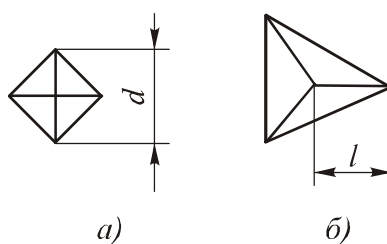


Рис. 3. Отпечатки инденторов Виккерса (а) и Берковича (б):
 d – размер отпечатка по диагонали; l – длина горизонтальной проекции отпечатка

Перед началом серии испытаний проводят калибровку нанотвердомера по эталонному образцу с известным модулем упругости (например, плавленный

кварц, $E = 72$ ГПа, $H = 9,5$ ГПа), а измерения производят при нагрузке 10 МН и скорости нагружения 0,33 МН/с.

Затем задают параметры испытания: нагрузка, скорость нагружения, время выдержки под нагрузкой и скорость разгрузки. При этом управляющая программа позволяет сохранить на жестком диске персонального компьютера для каждого испытания 1000 точек с координатами «время–нагрузка–глубина вдавливания».

Типичная кривая непрерывного индентирования в виде зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки представлена на рис. 4 [2]. Здесь верхняя кривая соответствует нагружению и отражает сопротивление материала внедрению индентора, а нижняя – описывает возврат деформации после снятия внешней нагрузки и характеризует упругие свойства материала.

При внедрении индентора вблизи области контакта создается сложное напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, а деформация, распространяющаяся вглубь материала, имеет как пластическую (необратимую), так и упругую (обратимую) составляющие. Благодаря этому при непрерывном индентировании оказывается возможным рассчитать:

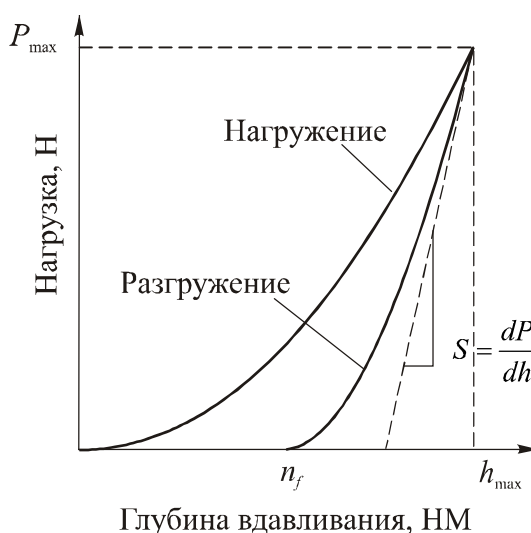


Рис. 4. Типовая диаграмма вдавливания индентора

- *твердость (отношение максимальной нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка)*

$$HV = 1,854P / d^2 \text{ (пирамида Виккерса);}$$

$$H\Delta = 1,570P / l^2 \text{ (пирамида Берковича);}$$

- *приведенный модуль упругости Юнга*

$$E_r = \frac{(\sqrt{\pi} \cdot S)}{2\beta\sqrt{A}}; \frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i},$$

где S – контактная жесткость, $S = \frac{dP}{dh}$; β – коэффициент, $\beta = 1,012$ (пирамида Виккерса), $\beta = 1,034$ (пирамида Берковича); A – площадь проекции восстановленного отпечатка; ν , ν_i – коэффициенты Пуассона соответственно для стали ($\nu = 0,25$) и алмаза ($\nu_i = 0,07$); E_i – модуль упругости алмаза, $E_i = 1140$ ГПа;

в) упругое восстановление (доля упругой составляющей в общей деформации)

$$R = (h_m - h_f) / h_m,$$

где h_m – наибольшая глубина погружения индентора; h_f – глубина отпечатка после снятия нагрузки.

Таким образом, в методе наноидентирования твердость определяется исходя из площади невосстановленного отпечатка, т. к. определение твердости по площади восстановленного отпечатка в случае использования материалов, у которых упругое восстановление $R > 10...20$ % дает завышенные значения твердости.

в) адгезионная прочность связи покрытия с подложкой

- *метод вдавливания (отслаивания)*

В поверхность плоского образца с нанесенным покрытием на приборе Роквелла (шкала С) вдавливают алмазный индентор под определенной нагрузкой, приводящей к появлению повреждений в покрытии (рис. 5). После снятия нагрузки делают микрофотографии зоны вдавливания. Качественную

оценку прочности адгезионной связи осуществляют путем сравнения полученных микрофотографий с эталонными (рис. 6), а количественную – по отношению площади отпечатка к площади скола покрытия, образующегося в результате вдавливания индентора;

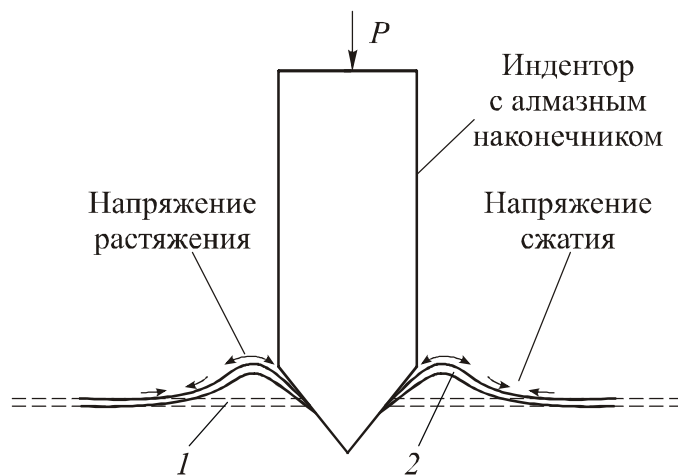


Рис. 5. Схема определения адгезионной прочности покрытия методом вдавливания с помощью прибора Роквелла: 1 – первоначальное состояние поверхности образца с покрытием; 2 – деформированная поверхность покрытия после приложения нагрузки

- *склерометрический метод (скретч-тест)*

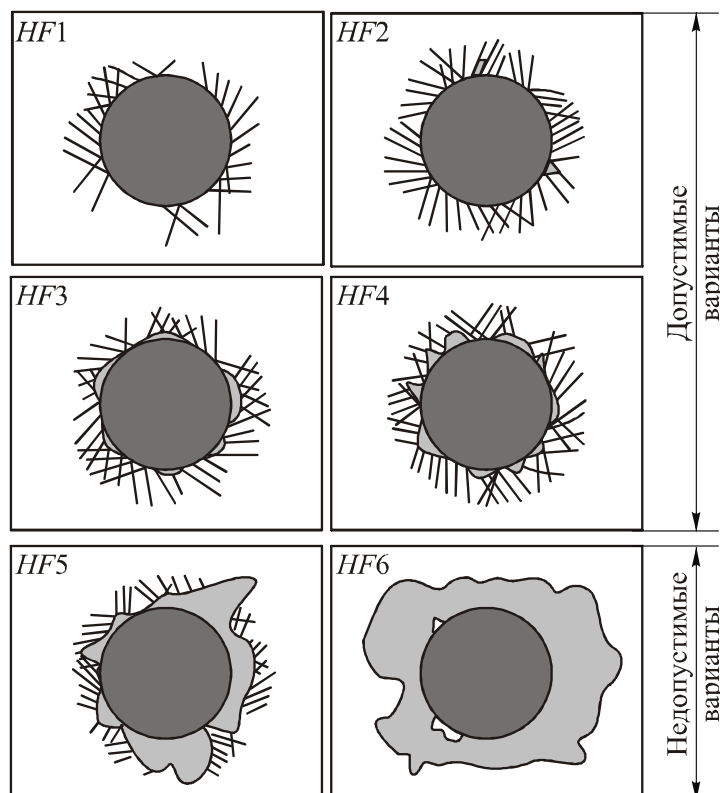


Рис. 6. Варианты разрушения покрытий ($HF1-HF6$) на образце в результате вдавливания индентора на приборе Роквелла ($VDI 3198$)

На поверхность покрытия алмазным индентором наносится царапина при постоянной, постепенно нарастающей или пошаговой нагрузке (рис. 7). При определенной критической нагрузке $L_c(H)$ покрытие начинает разрушаться. При этом данные критической нагрузки фиксируются с высокой точностью с помощью акустического датчика, а также с помощью встроенного оптического микроскопа. Значение критической нагрузки используют для расчета адгезионной силы в системе «покрытие–подложка». Кроме акустической эмиссии измеряют прилагаемую нормальную нагрузку P , силу трения и глубину проникновения индентора. В совокупности эти параметры определяют уникальный «почерк» каждого покрытия.

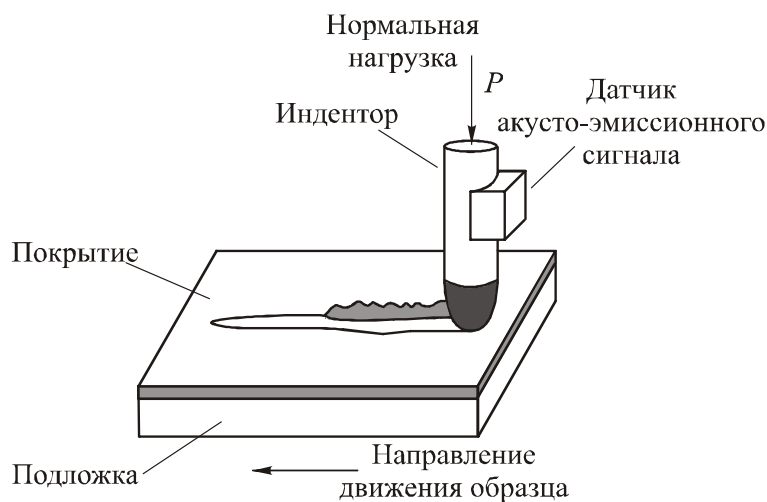


Рис. 7. Схема контроля адгезионной прочности покрытия методом скретч-тестирования (царапания)

В настоящее время для контроля прочности покрытия широко применяют скретч-тестеры фирмы *GSM Instruments* (Швейцария) (табл. 2).

2. Основные технические характеристики скретч–тестеров

фирмы *GSM Instruments*

Технические характеристики	Тип прибора		
	Нанотест	Микротест	Макротест
Нормальная нагрузка, Н	0,01...1,0	0,3...30,0	0,5...200,0
Максимальная сила трения, Н	1	30	200
Максимальная длина царапины, мм	120	120	70
Скорость нанесения царапины, мм/мин	0,4...600	0,4...600	0,4...600
Максимальная глубина царапины, мм	2	1	1
Увеличение видеомикроскопа	×200, ×800, ×4000	×200, ×800	×200, ×800

г) износостойкость покрытий

Оценивают на машинах трения в соответствии с международными стандартами *DIN* (стандарт Германии) и *ASTM* (стандарт Американского общества испытания материалов). Это, например, автоматизированная машина трения *Tribometer* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария). Она позволяет осуществлять комплексное трибологическое исследование, которое включает [1]:

- непрерывную запись коэффициента трения по схеме «шарик–вращающийся диск» (рис. 8)

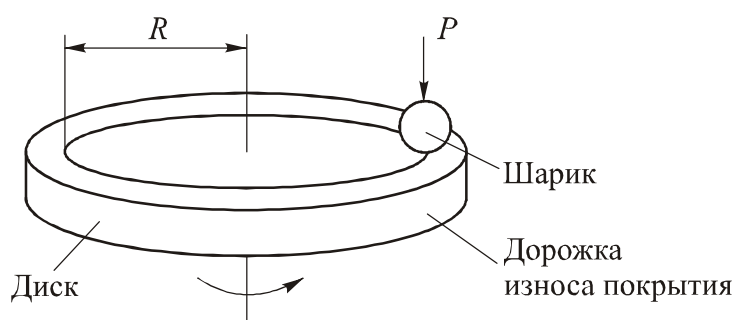


Рис. 8. Схема испытания износостойкости покрытий на машине трения *Tribometer* фирмы *GSM Instruments*

- *фрактологическое исследование дорожки износа покрытия и площадки износа шарика.*

Размеры дорожек и площадок износа измеряют оптическим микроскопом *Axiovert CA25* фирмы *Karl Zeiss* (Германия) и стереомикроскопом *MBC*. Затем рассчитывают объемы шарика V_{ϕ} и покрытия V_i , удаленные в процессе их износа по формулам

$$V_{\phi} = \pi \cdot h^2 (r - 1/3h),$$

где h – высота сегмента, $h = r - \left[r^2 - (d'/r)^2 \right]^{1/2}$; r – радиус шарика; d' – диаметр площадки износа шарика.

$$V_i = S \cdot l,$$

где S – площадь поперечного сечения дорожки износа покрытия; l – длина дорожки износа, $l = 2\pi R$; R – радиус дорожки износа.

На основе данных об объемах изношенных материалов с помощью компьютерной программы *InstrumX for Tribometer GSM Instruments* рассчитывают скорости износа покрытия и контртела (шарика), а, соответственно, судят об износостойкости изучаемого покрытия.

Библиографический список

1. Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей // X Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России». –М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш». –2004. –С. 311–318 с.
2. Булычев С.И. Методики кинетического нано-, микро- и макроиндентирования: практическое пособие по определению физико-технических свойств материалов. –М.: МГИУ. –2009. –80 с.