

# МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ШАРОВОГО ИСТИРАНИЯ

Автор: студент гр. МО-15 *Алехнович Варвара Владимировна*  
 Научный руководитель: д.т.н. *Гоголинский Кирилл Валерьевич*  
 Санкт-Петербургский горный университет

**Введение.** Для измерения толщины покрытий применяются различные средства и методы неразрушающего контроля [1]. В частности, для контроля толщины металлических покрытий широко используют вихревые толщинометры, реализующие амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый методы измерений, основанные на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в объекте контроля. Проверка и калибровка этих приборов производится, как правило, с помощью мер, представляющих собой образцы покрытий, нормированные по ряду параметров [2]. В то же время, не всегда имеется возможность изготовить и аттестовать меры или натурные образцы конкретных типов покрытий. Кроме того, в соответствии с существующей поверочной схемой для средств измерений толщины покрытий [3], сами меры должны проследиваться к эталонам единицы длины. Вследствие этого существует необходимость прямых измерений геометрических размеров (толщин) покрытий, в том числе разрушающими методами. Одним из таких методов является метод шарового истирания [4].

Целью данной работы является определение методической погрешности в рамках метрологической аттестации методики измерения толщины покрытий методом шарового истирания.

Методика измерения толщины покрытий методом шарового истирания и расчета приведена в соответствии с [4]. Шар, смоченный абразивной суспензией, вращается на поверхности испытуемого образца. Схема проведения испытаний см. рисунок 1, где 1 – шар, 2 – образец. Образуется сферообразная выемка износа, и испытание завершается, когда глубина проникновения сферообразной выемки больше, чем толщина покрытия. Толщина покрытия определяется по размерам следов износа (диаметр полной выемки и диаметр выемки подложки) и диаметру шара (см. Рисунок 2).

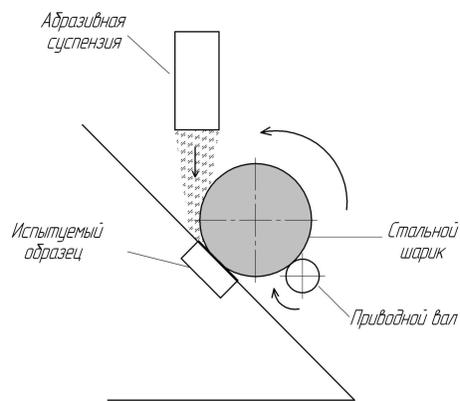


Рисунок 1. Схема измерения

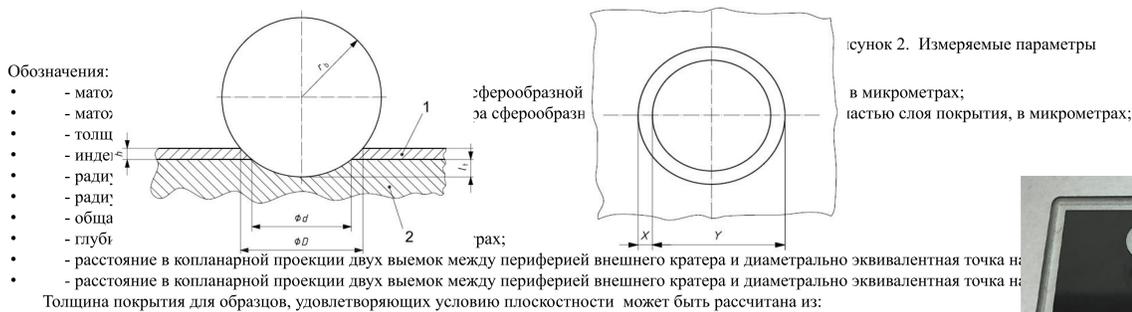


Рисунок 2. Измеряемые параметры

- Обозначения:
- $r_s$  – радиус шара; в микрометрах;
  - $D_m$  – диаметр выемки; в микрометрах;
  - $d_m$  – диаметр выемки подложки; в микрометрах;
  - $h$  – толщина покрытия; в микрометрах;
  - $X$  – диаметр выемки; в микрометрах;
  - $Y$  – диаметр выемки подложки; в микрометрах;
  - $\phi_d$  – диаметр шара; в микрометрах;
  - $\phi_{d_1}$  – диаметр выемки; в микрометрах;
  - $\phi_{d_2}$  – диаметр выемки подложки; в микрометрах;
  - $h_1$  – глубина выемки; в микрометрах;
  - $h_2$  – глубина выемки подложки; в микрометрах;
  - $r$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_1$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_2$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_3$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_4$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_5$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_6$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_7$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_8$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_9$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{10}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{11}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{12}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{13}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{14}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{15}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{16}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{17}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{18}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{19}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{20}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{21}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{22}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{23}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{24}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{25}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{26}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{27}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{28}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{29}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{30}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{31}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{32}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{33}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{34}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{35}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{36}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{37}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{38}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{39}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{40}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{41}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{42}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{43}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{44}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{45}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{46}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{47}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{48}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{49}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{50}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{51}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{52}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{53}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{54}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{55}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{56}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{57}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{58}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{59}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{60}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{61}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{62}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{63}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{64}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{65}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{66}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{67}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{68}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{69}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{70}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{71}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{72}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{73}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{74}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{75}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{76}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{77}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{78}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{79}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{80}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{81}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{82}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{83}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{84}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{85}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{86}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{87}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{88}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{89}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{90}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{91}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{92}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{93}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{94}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{95}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{96}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{97}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{98}$  – радиус выемки; в микрометрах;
  - $r_{99}$  – радиус выемки подложки; в микрометрах;
  - $r_{100}$  – радиус выемки; в микрометрах;

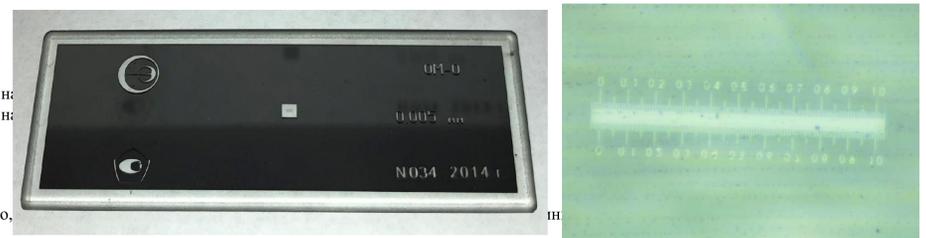
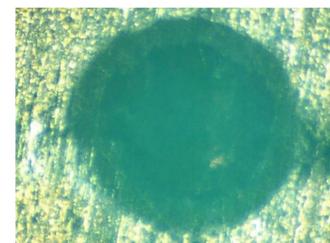


Рисунок 5. Мера штриховая оптическая. а – общий вид, б – вид под микроскопом

Для тонких покрытий (толщиной от 3 мкм до 5 мкм) глубина проникновения мала по сравнению с радиусом шара. Следовательно,

Для образцов, не удовлетворяющих условию плоскостности, уравнение изменится следующим образом:

**Погрешность результатов измерений.** Суммарная погрешность измерения складывается из следующих компонент: – случайная погрешность измерения внешнего диаметра выемки, – случайная погрешность измерения внутреннего диаметра выемки; – погрешность измерения радиуса шара; – суммарная методическая погрешность. Все составляющие суммарной методической погрешности рассчитаны на основе приборной погрешности.

- Приборная погрешность определяется через погрешность оптического микроскопа путем проведения серии измерений объект-микрометра (ОМО) в разных точках предметного столика, при разных углах поворота объект-микрометра. Предельно допустимая погрешность оптического микроскопа не превышает 10 мкм.
- Для вычисления составляющих погрешности были взяты частные производные по каждому параметру (формулы (1), (2), (3) в зависимости от толщины покрытия и кривизны поверхности) и вычислены отклонения расчетного значения  $h$  вследствие влияния приборной погрешности.

В таблице 1 приведены результаты численной оценки методической погрешности измерения толщины покрытий методом шарового истирания. Расчет значений погрешности произведен для плоской поверхности, шара диаметром 30 мм, толщин покрытий в диапазоне 3 мкм÷50 мкм, и соотношения  $D/d=3/2$ .

$\Delta h(D_m)$ , мкм	0,249
$\Delta h(d_m)$ , мкм	0,170
$\Delta h(r_s)$ , мкм	0,110
$\Delta_{гр}$ , мкм	0,321

Таблица 1. Расчетное значение погрешностей для шара диаметром 30 мм

(3)

Таким образом, методическая погрешность измерения толщин покрытий в диапазоне от 3 до 50 мкм методом шарового истирания для шара диаметром 30 мм не превышает 5%.

## Экспериментальная часть.

Для получения выемки на образце был использован прибор «Константа Ш1» (Рисунок 3, под номером 1).

$D_m$ , мм	0,8	1,5	2,08	2,6	3	3,23
$d_m$ , мм	0,5	1	1,4	1,7	2	2,15
$h$ , мм	0,003	0,01	0,02	0,03	0,042	0,049
$\Delta h(D_m)$ , мкм	0,13	0,25	0,35	0,44	0,5	0,54
$\Delta h(d_m)$ , мкм	0,042	0,17	0,33	0,48	0,67	0,77
$\Delta h(r_s)$ , мкм	0,021	0,11	0,23	0,36	0,49	0,57
$\Delta_{гр}$ , мкм	0,14	0,32	0,53	0,75	0,97	1,1
$\Delta_{гр}$ , %	4,7	3,2	2,6	2,5	2,3	2,3