

И. А. Кострикина, Л. А. Макаркин

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБЪЕКТОВ
ВЫСОКОГО КЛАССА ЧИСТОТЫ

I. A. Kostrikina, L. A. Makarkin

METHOD OF MEASURING ROUGHNESS OBJECTS
OF HIGH CLASS OF PURITY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются ситалловые подложки высокого класса чистоты. Предметом исследования являются способы измерения параметров шероховатости с малыми значениями R_z . Целью работы является разработка способа измерения шероховатости поверхности высокого класса чистоты путем применения профильной меры. **Материалы и методы.** Для описания процесса измерения шероховатости использована Гауссова модель. Рассмотрен контактный метод измерения шероховатости. **Результаты.** Предложен подход к реализации измерений шероховатости поверхностей высокой чистоты, основанный на применении эталонной меры шероховатости, позволяющий повысить чувствительность контактного метода измерения шероховатости профилометром. **Выводы.** Метод измерений шероховатости поверхностей высокой чистоты позволяет повысить чувствительность стандартных профилометров. Предложенный метод измерения шероховатости за счет использования эталонной профильной меры шероховатости обеспечивает возможность измерения на поверхностях высокого класса чистоты применением стандартных профилометров среднего класса точности.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is high-purity sieveall substrates. The subject of the research is the methods of measuring roughness parameters with small R_z values. The aim of the work is to develop a method for measuring the surface roughness of high grade purity by applying a profile measure. **Materials and methods.** To describe the process of measuring the roughness used a Gaussian model. The contact method of roughness measurement is considered. **Results.** An approach to the implementation of measuring the roughness of surfaces of high purity, based on the use of a reference roughness measure, allows to increase the sensitivity of the contact roughness measurement method with a profilometer. **Conclusions.** The method of measuring the surface roughness of high purity, allows to increase the sensitivity of standard profilometers. The proposed method for measuring roughness through the use of a standard profile measure of roughness makes it possible to measure on surfaces of high grade purity using standard profilometers of the middle class of accuracy.

К л ю ч е в ы е с л о в а: объект исследования, ситалловые подложки, измерение шероховатости поверхности.

K e y w o r d s: object of research, sital substrates, surface roughness measurement.

Детали могут иметь различную шероховатость поверхностей, зависящую от способов их изготовления.

Характеристики и параметры шероховатости поверхностей устанавливает ГОСТ 2789–73, требования которого распространяются на поверхности изделий независимо от их материала и

способа изготовления (исключение составляют ворсистые, пористые и аналогичные поверхности).

Согласно стандарту ГОСТ 2789–73 под шероховатостью поверхности понимают совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины (рис. 1).

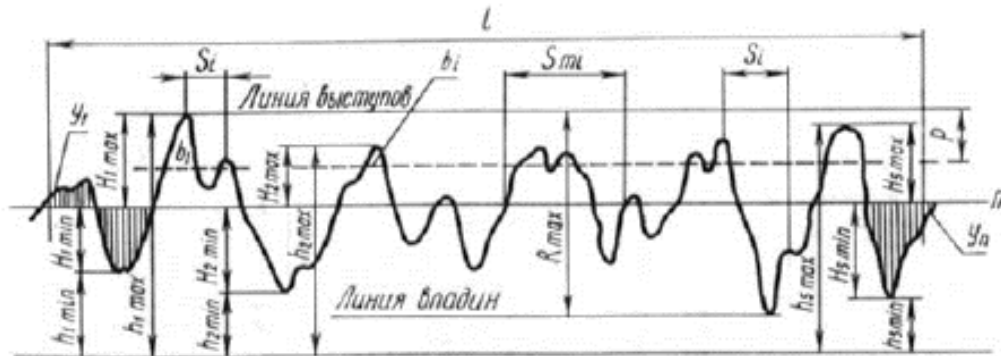


Рис. 1. Параметры шероховатости

Базовую длину стандарт определяет как длину базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Базовая линия имеет идеальную геометрическую форму, соответствующую номинальному профилю рассматриваемой поверхности. Она может быть прямой, дугой окружности или иметь иную форму, которая определяется нормальным сечением номинальной поверхности плоскостью. Шероховатость поверхности описывают характеристиками и параметрами микронеровностей профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью, направленной по нормали к ней. В случае, когда к реальной поверхности может быть проведено множество нормальных секущих плоскостей, выбирают сечение, имеющее максимальные параметры шероховатости, если направление измерения шероховатости не оговорено специально.

В работе [1] приведены 23 параметра шероховатости, однако на практике применяются Rz , Ra и $R_{\max}$ (табл. 1).

Таблица 1

Термин	Обозначение	Определение
1	2	3
1. Базовая длина	l	Длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности
2. Средняя линия профиля	m	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, чтоб в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально
3. Средний шаг неровностей профиля	Sm	Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
4. Средний шаг местных выступов профиля	S	Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины
5. Высота неровностей профиля по десяти точкам	Rz	Сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины $Rz = \frac{\sum_{i=1}^S y_{pmi} + \sum_{i=1}^S y_{umi} }{S},$ где y_{pmi} – высота i-го наибольшего выступа профиля; y_{umi} – глубина i-й наибольшей впадины профиля

Окончание табл. 1

1	2	3
6. Наибольшая высота профиля	$R_{\max}$	Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины
7. Отклонение профиля	y	Расстояние между любой точкой профиля и средней линией
8. Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	Среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y dx,$ $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y ,$ где l – базовая длина; n – число выбранных точек профиля на базовой длине

R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины; R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины; $R_{\max}$ – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Существует большое количество методов измерения параметров шероховатости [2–10].

В основном все они делятся на две группы:

1) методы, основанные на дифракции электромагнитного излучения на неоднородной границе раздела сред (оптические и рентгеновские):

- метод светового сечения;
- растровый метод;
- рефлектометрический метод;
- метод слепков;
- метод сравнения с образцовой деталью;
- интерференционный метод;
- 2) прямые методы контроля микрорельефа:
 - механическая профилометрия;
 - атомно-силовая и туннельная микроскопия.

Каждому из методов измерения шероховатости поверхности присущи свои особенности, и выбор того или иного метода должен определяться конкретными задачами. Но наиболее точными являются прямые методы – профилометрические.

Суть профилометрического метода заключается в следующем [4, 7, 10]

По исследуемой поверхности перемещается специальная алмазная игла, колеблющаяся от неровностей поверхности. Такие колебания иглы передаются на датчик, где преобразуются в малые электрические токи, которые в свою очередь усиливаются и регистрируются. Показания выводятся на дисплей прибора и дают представление о характере неровностей исследуемой поверхности – их высоте и глубине.

Однако данный метод имеет один большой недостаток, он является разрушающим и оставляет царапины.

В настоящее время при изготовлении многих изделий электронной техники при тонкопленочной технологии применяют ситалловые подложки, в частности СТ-50-1, разных классов [3].

Ситалловые подложки СТ-50-1 представляют собой пластины из стеклокерамического материала на основе стекла и предназначены для изготовления пленочных микросхем (рис. 2).

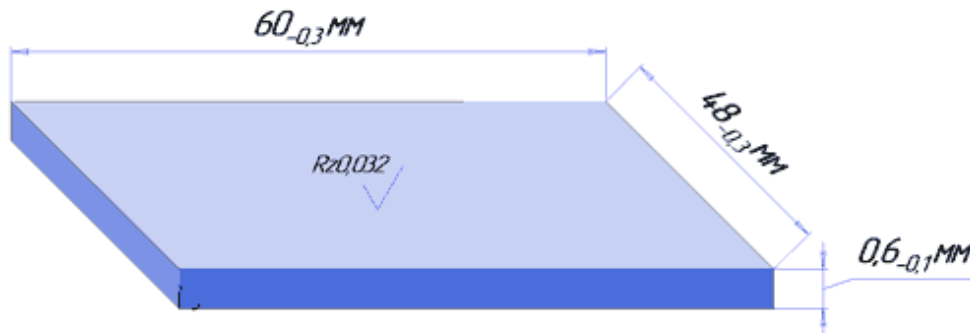


Рис. 2. Ситалловая подложка

Технические характеристики СТ-50-1

Шероховатость рабочей поверхности R_z – не более 0,032 мкм.

Шероховатость нерабочей поверхности R_z – не более 4 мкм.

Плотность СТ-50-1 ситалловой подложки – от 2,6 до 2,7 г/см³.

Микротвердость – 705 кгс/мм².

Термостойкость – + 210° С.

Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц – от 8 до 9.

Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц – не более 15.

Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре + 100° С – 10^{14} Ом·см.

Температурный коэффициент линейного расширения Альфа·10⁷ К⁻¹ в интервале температур от + 20° С до + 300° С – от 50 до 54.

Габаритные размеры – 60×48×0,6 мм.

Одним из главных параметров подложек является шероховатость поверхности R_z , которая согласно техническим условиям должна быть не менее 0,032 мкм – для 1-го класса и 0,1 – для 3-го класса.

Если с подложками 3-го класса проблем не возникает, то при применении подложек 1-го класса возникают проблемы с измерением малых значений R_z , так как не все профилометры позволяют обеспечить данный диапазон измерения.

Такая проблема возникла в АО «НИИЭМП» при смене поставщика подложек 1-го класса.

На предприятии для контроля шероховатости применяется японский профилометр Surftest SJ-210 (рис. 3) со следующими характеристиками:

- минимальный диапазон/дискретность (25 мкм / 0,002 мкм);
- параметры R_a , R_q , R_z , R_y , R_v , R_t , R_{3z} , R_{sk} , R_{ku} , R_c , R_{Pc} , R_{Sm} , R_{max}^*1 , R_{z1max} , S , HSC , R_{zJIS}^*2 , R_{ppi} , $R_{\Delta a}$, $R_{\Delta q}$, R_{lr} , R_{mr} , $R_{mr}(c)$, R_c , R_k , R_{pk} , R_{vk} , $Mr1$, $Mr2$, $A1$, $A2$, Vo , R_{pm} , tp , Htp , R , R_x , AR ;
- длина трассы 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм;
- число измерений $x1$, $x2$, $x3$, $x4$, $x5$, $x6$, $x7$, $x8$, $x9$, $x10$;
- автовыключение 10-600 с при работе от аккумуляторной батареи;
- разъемы USB, SPC, RS-232C, для удаленного управления, MicroSD;
- стандарты JIS'82, JIS'94, JIS'01, ISO, ANSI, VDA;
- результаты измерения: цифровые значения, кривая, график;
- питание: (Ni-MH) аккумуляторная батарея, до 4 ч;
- диапазон измерения профилометра Surftest SJ-210 Mitutoyo: X-ось (17,5 мм), Z-ось 360 мкм (–200 мкм~ + 160 мкм);
- скорость трассировки: при измерении 0,25; 0,5; 0,75 мм/с; при возврате 1 мм/с;
- зонд: стилус радиусом наконечника 5 мкм.

Но при измерении шероховатости подложек оказалось, что R_z составляет от 0,050 до 0,055 мм вместо 0,032, причем на всех партиях.

Авторами были рассмотрены возможности других профилометров. Так, на приборе для измерений текстуры поверхности FORM TALYSURF 50 (рис. 4) были получены результаты, представленные на рис. 5.



Рис. 3. Профилометр Surftest SJ-210

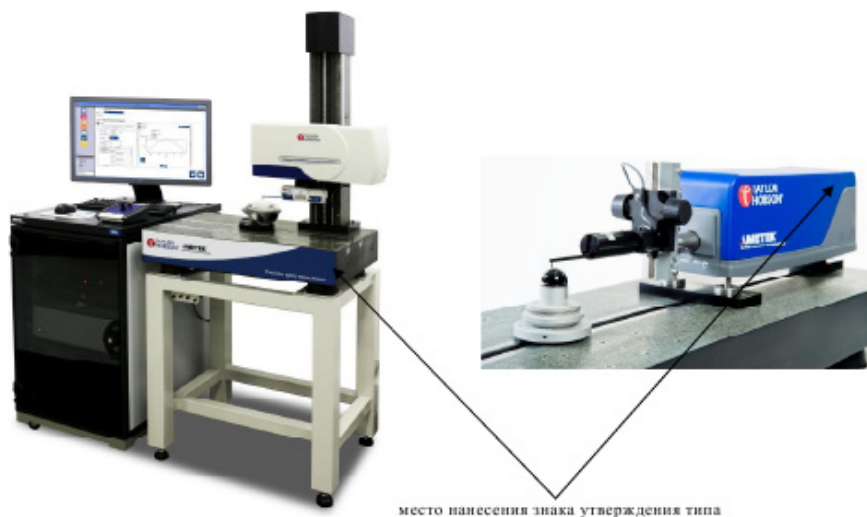


Рис. 4. Прибор FORM TALYSURF 50

Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Пензенской области» (ФБУ «Пензенский ЦСМ») 440039, г. Пенза, ул. Комсомольская, 20		РЕГИСТР РСМ 440039	
СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ № Гк-17 579153			
Наименование, тип средства измерений	Подложка ситаловая		
заводской номер	13		
принадлежащее	ОАО «НИИЭМП», г. Пенза, ул. Каракозова, д. 44 наименование юридического лица, адрес		
Место проведения калибровки	ФБУ «Пензенский ЦСМ»		
Методика калибровки	Типовая методика калибровки средств измерений длины № МК-01; утвержденная зам. директора ФБУ «Пензенский ЦСМ» 01.04.2015 г.		
Условия калибровки	Температура 20,6 °С, Относительная влажность 57 %		
Применимые эталоны	3.1.ZBM.0190.2012 ГЭЕ длины в области измерений параметров шероховатости поверхности 2 порядка в диапазоне значений от 0,1 до 50 мкм (Прибор Форм Талисурф № 449)		
Рекомендуемый интервал между калибровками: 12 месяцев Дата проведения калибровки « 07 » сентября 20 17 г. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ: 1. Внешний осмотр: дефекты отсутствуют 2. Определение значений:			
№ п/п	Наименование характеристики	Нормированное значение	Измеренное значение
1	Шероховатость поверхности, мкм		Ra 0,0050 Rz 0,0318 Rz (стандарт JIS) 0,0234
Главный метролог		Ю.Г. Тюрина инициалы, фамилия	
Начальник лаборатории		Н.И. Леонова инициалы, фамилия	
Для документов № 5 (Печать ФБУ «Пензенский ЦСМ» и печать лаборатории)			
Факс 49-42-63, 49-42-48; Емкостные 49-51-76; Сектор метрологии 49-42-48; Отделы поверки СИ: Метрологический 49-47-53; Технический 49-79-65; Радиотехнический 49-91-33; Электронный 49-51-85; Прием в эксплуатацию приборов			

Рис. 5. Результаты калибровки

Из сертификата видно, что измеренное значение R_z составляет 0,0318 мкм.

На основании результатов, полученных на приборе FORM TALYSURF 50, авторами была разработана методика калибровки профилометра Surftest SJ-210 с целью обеспечения бесперебойного входного контроля ситалловых подложек.

Для этого была приобретена мера шероховатости ПРО-10 (рис. 6), характеристики которой представлены в табл. 2.



Рис. 6. Мера шероховатости ПРО-10

Таблица 2

Наименование характеристики	Значение
Диапазон номинальных значений параметра R_a , мкм	от 0,001 до 400
Диапазон номинальных значений параметра R_z , мкм	от 0,002 до 1000
Диапазон номинальных значений параметра R_{Sm} , мкм	от 1,0 до 8000
Предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения параметра R_a (Δ_0), %	от 12 до 0,1
Предел допускаемого относительного среднеквадратического отклонения параметра R_{Sm} (СКО), %	5
Габаритные размеры меры, мм, не более	
– длина	10
– ширина	10
– толщина	2
Размеры рабочей области меры, мм, не более	
– длина	5
– ширина	5
Масса меры, г, не более	120
Нормальная область значений температур, °C	от + 15 до + 25
Относительная влажность воздуха, %, не более	80

Суть методики заключается в следующем. Проводится измерение значения меры шероховатости ПРО-10 (R_{zm}) на профилометре Surftest SJ-210 и определяется отклонение ΔR_{zm} значения меры от номинального значения R_{zn} по формуле

$$\Delta R_{zm} = R_{zn} - R_{zm}.$$

Затем на том же приборе измеряется шероховатость ситалловой подложки (R_{zp}). За действительное значение шероховатости ситалловой подложки (R_{zd}) принимается значение, вычисленное по формуле

$$R_{zd} = R_{zp} - \Delta R_{zm}.$$

Данная методика позволяет проводить измерения шероховатости объектов 13-го и 14-го классов чистоты с высокой достоверностью.

Библиографический список

1. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
2. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 472 с.
3. Невлюдов, И. Ш. Анализ методов контроля шероховатости подложек для изделий электронной техники / И. Ш. Невлюдов, И. В. Жарикова, И. Д. Перепелица, А. Г. Резниченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/5 (68). – С. 25–29.
4. Егоров, В. А. Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности / В. А. Егоров. – Москва : Машиностроение, 1965. – 224 с.
5. Взаимозаменяемость, стандартизация и технологические измерения / под ред. А. Д. Никифорова. – Москва : Высш. шк., 2000. – 510 с.
6. Клепиков, В. В. Качество изделий / В. В. Клепиков, В. В. Порошин, В. А. Голов. – Москва : МГИУ, 2005.
7. Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – Москва : Машиностроение, 1978.
8. Чекмарев, А. А. Справочник по машиностроительному черчению / А. А. Чекмарев, В. К. Осипов. – Москва : Высш. шк., 2005.
9. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова ; под ред. В. С. Корсакова. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1977. – 416 с.
10. Технология машиностроения : в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов. – 2-е изд., стереотип. / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 564 с.

Кострикина Инна Анатольевна

кандидат технических наук, главный метролог,
АО «НИИЭМП»
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: gmetr@niiemp.ru

Kostrikina Inna Anatol'evna

candidate of technical sciences, chief metrologist,
Research Institute of Electron-Mechanical Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Макаркин Леонид Алексеевич

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: leonmakarkin@gmail.com

Makarkin Leonid Alekseevich

master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Кострикина, И. А. Методика измерения шероховатости объектов высокого класса чистоты / И. А. Кострикина, Л. А. Макаркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 48–54. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-7.