

## МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.И. Олейник<sup>1</sup>, Е.И. Олейник<sup>1</sup>, В.Н. Шмаров<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>НПО «Метрология», <sup>2</sup>«Укрспецэкспорт», Киев)

*Разработана установка для измерения широкоугольных индикатрис рассеяния шероховатых поверхностей и отражательных способностей рассеивающих металлических и неметаллических материалов. Произведена оценка погрешностей измерения. Выполнены экспериментальные исследования индикатрис обратного отражения шероховатых поверхностей с крупномасштабными неоднородностями в диапазоне пространственных углов до 180°. Исследованы отражательные характеристики алюминиевых материалов с защитными покрытиями.*

### **обратное отражение, лазерное излучение, шероховатые поверхности**

**Введение.** Измерение параметров крупногабаритных металлических промышленных изделий со сложной геометрической формой, наиболее широко используемых в машиностроении, авиастроении, судостроении, транспортном машиностроении и в крупномасштабном строительстве представляет актуальную задачу приборостроения. Такие задачи для диапазона измерения линейных величин до 1 м и ограниченного диапазона угловых величин решаются с использованием специализированных координатных измерительных машин и оптических угломерных приборов [1 – 3].

Обеспечить измерение с высокой технологической точностью подобных изделий в диапазоне измерения линейных величин более одного метра и (или) имеющих сложную геометрическую форму, включая наличие на поверхности впадин и выпуклостей, осевой (круговой) симметрии(асимметрии), традиционными методами измерений не представляется возможным. В этих случаях необходимо применять дистанционные методы измерений с использованием лазерных источников зондирования. Вместе с тем следует помнить, что такие промышленные изделия обычно имеют шероховатую поверхность, неровности которой  $h$  относятся к крупномасштабным ( $h \gg \lambda$ ).

Дистанционные лазерные измерения базируются на регистрации отраженного от такой поверхности светового сигнала, интенсивность которого зависит от мощности зондирующего сигнала, формы диаграммы обратного отражения, чувствительности и угла зрения фотоприемника, фиксирующего эхосигнал. На подобных поверхностях эхосигнал обычно формируется с широкой диаграммой (индикатрисой) обратного излучения. Часто индикатриса обратного отражения близка к круговой.

Измерению индикатрис рассеяния от различных поверхностей в узком диапазоне пространственных углов посвящено достаточно много работ, в том числе и работы [4, 5].

В данной работе приведены результаты разработки установки и исследований на ней диаграмм обратного отражения шероховатых поверхностей с крупномасштабными неоднородностями с учетом поляризации зондирующего лазерного излучения.

**Исследование широкоугольных индикатрис обратного рассеяния шероховатых поверхностей при зондировании их лазерным излучением.** При отражении света от сложных шероховатых металлических поверхностей с крупномасштабными неоднородностями сформированный обратный эхосигнал рассеивается на неровностях поверхности. В этом случае индикатриса обратного рассеяния занимает пространственные углы до  $180^\circ$  [6 – 8]. Для такого широкого диапазона углов трудно обеспечить требуемое соотношение сигнал-шум при фотоэлектронном методе фиксации эхосигнала из-за малой интенсивности рассеяния светового потока и конечных угловых размеров излучателя и приемного устройств. Кроме этого, необходимо обеспечить конструктивные требования по установке их по одной оси.

В данной работе описана установка, с помощью которой экспериментально исследованы индикатрисы эхосигнала в пределах полного угла обратного рассеяния при отражении лазерного излучения от различного типа шероховатых поверхностей.

В качестве источника излучения используется газовый лазер 1 (рис. 1) непрерывного действия ЛГ-35, работающий в многомодовом режиме с угловым расхождением около 2-х угловых минут. Длина волны света 632,8 нм, степень поляризации 0,998'.

Лазерное излучение с диаметром поперечного сечения около 5 мм проходит через модулятор, ограничивающую диафрагму 2 и стеклянную плоскопараллельную пластину 5, расположенную под углом  $45^\circ$  к нему, и затем освещает исследуемую поверхность 4.

Для удобства проведения измерений конструктивно оптические элементы расположены так, что контролируемую поверхность можно располагать под любым углом к зондирующему лазерному излучению. Лазерный луч, рассеянный от поверхности под углом  $180^\circ$  и близкими к нему, направляется пластиной 3 на длиннофокусный объектив (МТО-500) 5 с фокусным расстоянием 500 мм, который собирает пучки одного направления в одной точке фокальной плоскости. Различные точки фокальной плоскости соответствуют различным углам рассеяния.

В этой плоскости устанавливается диафрагма с переменным диаметром, а на расстоянии 5 см от нее – фотоумножитель типа ФЭУ-84. Перемещение

ФЭУ с диафрагмой при помощи сканирующего устройства дает возможность измерять угловое распределение рассеянного светового поля в углах до  $90^\circ$  от направления в  $180^\circ$  от направления падающего излучения.

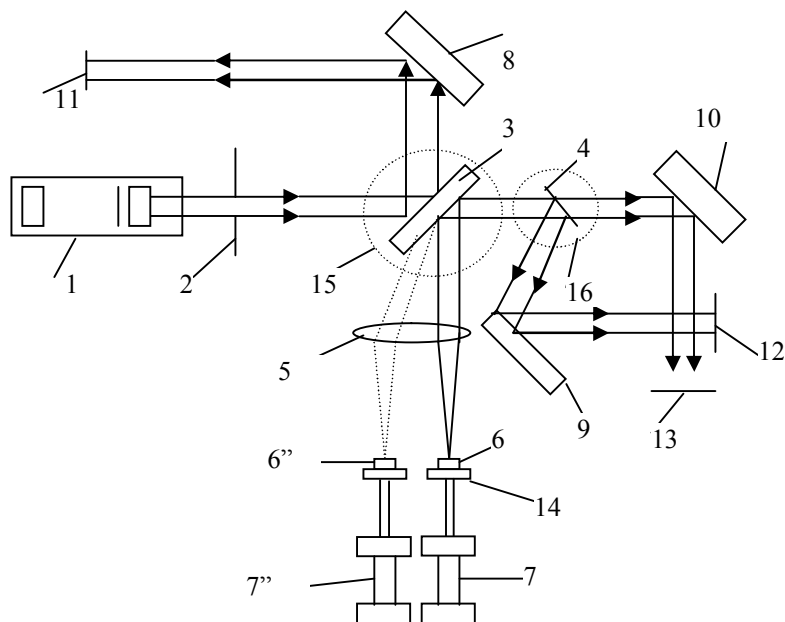


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 – лазер ЛГ-35; 2 – ограничивающая диафрагма; 3 – стеклянная поворотная плоскопараллельная пластинка; 4 – поверхность оптической детали; 5 – объектив; 6 – диафрагма приемника; 7 – ФЭУ; 8, 9, 10 – нейтральные черные стекла; 11, 12, 13 – световые ловушки; 14 – нейтральные светофильтры; 16 – предметные столики

Угловое разрешение приемной системы составляет  $5 - 15'$ . Сигнал с фотумножителя подается на специализированный узкополосный усилитель с синхронным детектором, принцип работы которого описан в работе [9].

Питание ФЭУ осуществляется от высоковольтного стабилизированного выпрямителя оригинальной разработки. Пластина 3 с плоскостью в  $1/10$  полосы используется для минимизации светового фона. С помощью пластин 8, 9, 10 и ловушек 11, 12 и 13 из черного бархата режетируются зеркальные составляющие световых лучей от пластины 3 и исследуемой шероховатой поверхности. Плоскопараллельные пластины 8, 9, 10 изготовлены из хорошо полированного черного стекла, которое за счет сильного поглощения в поверхностном слое обладает меньшим рассеянием, чем аналогично обработанные поверхности из непоглощающего материала.

Как показали исследования, использование светоделительного полупрозрачного зеркала с коэффициентами отражения и пропускания около 50% вместо стеклянной пластины 3 с целью увеличения измеряемого сигнала не дает желаемого результата в силу того, что в этом случае фон, возникающий от светоделительного зеркала, значительно превосходит величину рассеяния от контролируемой поверхности.

Для обеспечения юстировки установки плоскопараллельная стеклянная пластина 3 размещается на специальном столике 15. С помощью поворотных механизмов и специальных винтов, качающих столик относительно горизонтальной оси, она располагается перпендикулярно падающему пучку. Это положение фиксируется с точностью 3' по совмещению отраженного и падающих на него пучков света в плоскости диафрагмы 2 при визуальном наблюдении. Затем столик 15 с закрепленным на нем стеклом 3 поворачивается на 45° вокруг вертикальной оси от первоначального положения. Контролируемая поверхность располагается на отдельном столике 16.

Направление отраженного эхосигнала в фокальной плоскости линзы 5 определяется таким образом.

Исследуемая поверхность помещается на столике 16 перпендикулярно падающему пучку. Это обеспечивается совмещением падающего и зеркально отраженного от поверхности пучков. Часть отраженного от исследуемой поверхности пучка света направляется плоскопараллельной пластинкой 3, расположенной под углом 45° к падающему пучку, на линзу 5 и фокусируется ею на диафрагме 6. Диафрагма 6 вместе с фотоумножителем 7 может перемещаться относительно оптической оси объектива 5 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Этим обеспечивается возможность юстировки приемной системы относительно направления обратного эхосигнала с точностью до 3.

Затем определяется угол рассеяния, который может лежать в широком динамическом диапазоне и даже может быть близким к 180°, от направления падающего пучка в фокальной плоскости линзы 5. Это обеспечивается с помощью поворотного столика 16, на котором закреплена исследуемая поверхность. Отсчет ведется по лимбу с ошибкой в 30 угловых секунд.

Для сравнения рассеянного излучения в фиксированном направлении от различных поверхностей проводилась нормировка силы света рассеянного излучения  $I_p$  к потоку  $F_n$ , падающему на поверхность.

Величина  $F_n$  измеряется следующим образом. Перпендикулярно к падающему пучку на столике 16 устанавливается зеркало 4 с известным коэффициентом отражения. Световой поток, отраженный от зеркала 4 при помощи поворотной пластины 3, направляется на линзу 5. В фокальной

плоскости этой линзы находится диафрагма. Прошедшее через диафрагму излучение полностью регистрируется фотоумножителем, поскольку угол приема  $2\gamma = (5^1 - 15^1)$  больше расходимости лазерного пучка.

Отсчет  $\alpha_{\text{пад}}$ , получаемый на приборе, будет пропорционален  $F_{\text{п}}$ , т.е.

$$\alpha_{\text{пад}} = k_1 F_{\text{п}}. \quad (1)$$

Отсчет при измерении рассеяния от исследуемых образцов дает величину

$$\alpha_{\text{расс}} = k_2 F_{\text{расс}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{расс}}$  – поток, рассеянный образцом и зафиксированный прибором, в малом телесном угле  $\omega = \pi\gamma^2$ .

Рассеянный световой фон учитывается путем измерения интенсивности фона  $F_{\text{ф}}$  при углах, соответствующих углам рассеяния светового потока от образца.

Отсчет  $\alpha_{\text{фон}}$ , очевидно, равен

$$\alpha_{\text{фон}} = k_3 F_{\text{а}}. \quad (3)$$

Так как при измерении всех потоков использовались один и тот же приемник и регистрирующая система, то  $k_1 = k_2 = k_3$ . Эти условия выполняются, так как в пределах размеров светового пятна, падающего на фотоприемник ФЭУ, чувствительность его фотокатода можно считать постоянной. В применяемом нами ФЭУ указанное постоянство соблюдается с точностью 7 – 10%. Рассеивающие свойства образцов будем характеризовать величиной

$$\frac{\Delta I_{\text{расс}}}{F_{\text{пад}}} = \frac{\alpha_{\text{расс}} \alpha_{\text{фон}}}{\alpha_{\text{пад}} \omega} = \frac{\alpha_{\text{расс}} \alpha_{\text{фон}}}{\pi \alpha_{\text{пад}} \gamma^2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что при измерениях  $F_{\text{п}}$  для уменьшения интенсивности прямого света перед фотоумножителем располагаются нейтральные светофильтры 14, которые ослабляют излучение на несколько порядков, и поэтому  $\alpha_{\text{пад}}$  корректируется с учетом их коэффициента пропускания.

Результаты измерения рассеянного света шероховатыми поверхностями, обработанными абразивами и создающие различную высоту  $h$  неровностей (для М100 – нижняя кривая, М180 – средняя кривая и М240 – верхняя кривая), представлены на рис. 2, причем система отсчета углов сдвинута на  $180^\circ$  по отношению к начальной системе, т.е. угол рассеяния, равный  $180^\circ$ , теперь можно считать равным нулю. Если колебания электрического вектора  $E$  в падающем пучке происходят в плоскости падения, ввиду малости

рассеяния и из-за недостаточной чувствительности аппаратуры используется диафрагма с углом приема  $10'$ . Когда излучение поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, то измерения проводятся с угловым разрешением порядка  $5'$ .

Из рис. 2 видно, что интенсивность рассеяния слабо меняется с изменением угла.

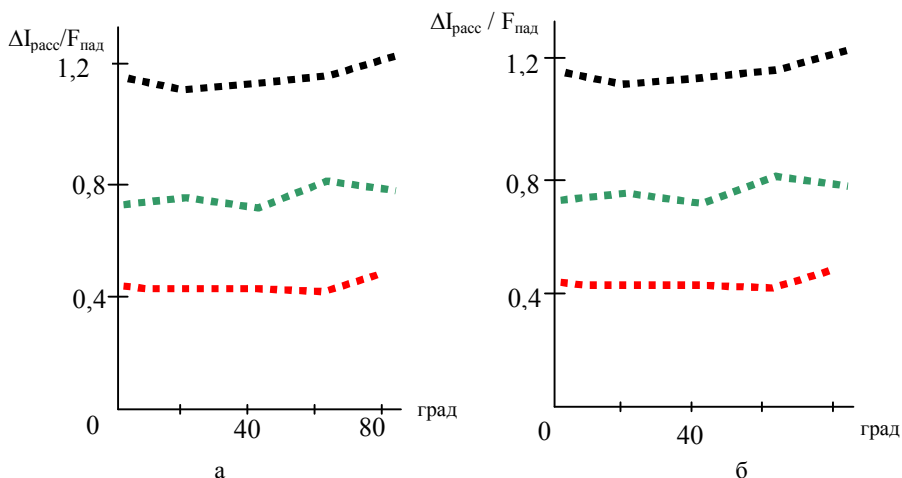


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния: а – падающее излучение поляризовано в плоскости падения; б – падающее излучение поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости падения

Сопоставление с кривыми, полученными с другой поляризацией  $E_{\perp}$  (рис. 3, а), свидетельствует о том, что рассеяние во втором случае превосходит величину рассеяния в первом в несколько раз. В случае поляризации падающего излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, наблюдается ярко выраженная структура, причем перепад яркостей очевидно лежит вне ошибок эксперимента. Различие в кривых для одних и тех же образцов и постоянной поляризации объясняется тем, что они получены для различных участков поверхности исследуемых образцов, которые, по-видимому, рассеивают по-разному из-за неравномерной обработки. Рассеяние лазерного излучения на шероховатых поверхностях с крупномасштабными неоднородностями носит сугубо диффузный характер.

Для сравнения рис. 3, б иллюстрирует рассеяние от плоскопараллельных металлических пластинок различной обработки (без полировки) – три типа. В этом случае обратное отражение носит как зеркальный, так и диффузный характер. С повышением качества обработки (нижние кривые) ин-

тенсивность потока рассеяния лазерного излучения, отраженного от полированных поверхностей, существенно падает.

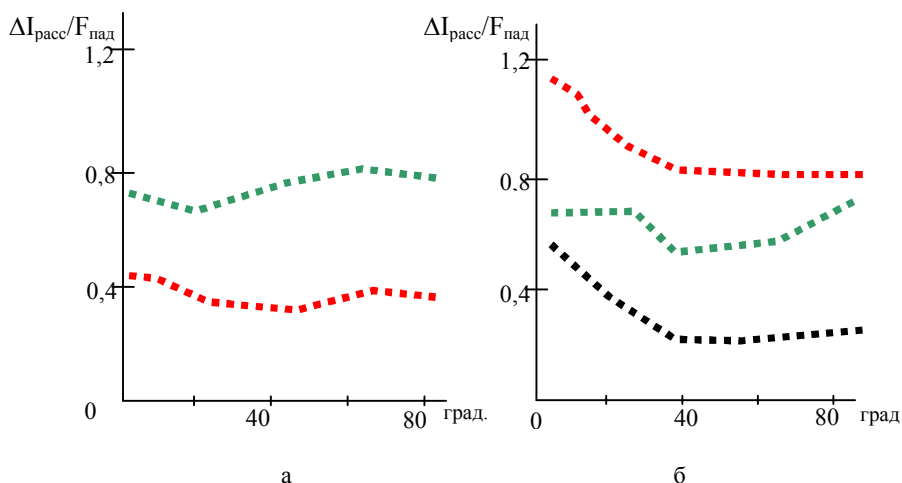


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния для плоскопараллельных пластин: а – двух типов (падающее излучение поляризовано в плоскости падения); б – трех типов (падающее излучение поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости падения)

Превышение рассеяния при освещении излучением, поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, объясняется, по-видимому, тем, что образцы расположены под углом Брюстера к падающему пучку. В этом случае зеркально отраженный луч содержит в основном компоненту светового поля  $E_{\perp}$ . Величина рассеяния для различных модельных образцов меняется, что, очевидно, связано с различным качеством обработки исследуемых деталей. Произведем оценку ошибок измерений. Согласно формуле (4), относительная погрешность измерения величины  $\Delta I_{\text{расс}} / F_{\text{пад}}$ , характеризующей рассеяние образца, имеет вид

$$\delta\left(\frac{\Delta I_{\text{расс}}}{F_{\text{пад}}}\right) = \frac{|\Delta T|}{T} + \frac{|\Delta \alpha_{\text{пад}}|}{\alpha_{\text{пад}}} + \frac{|\Delta \alpha_{\text{расс}}| + |\Delta \alpha_{\text{фон}}|}{\alpha_{\text{расс}} - \alpha_{\text{фон}}}, \quad (5)$$

где  $T$  – коэффициент пропускания центральных светофильтров 14 (рис. 1).

Первый член в правой части выражения (5) равен примерно 10% ввиду малости  $T$  (порядка  $10^{-8} - 10^{-9}$ ).

Величина  $|\Delta \alpha_{\text{пад}}| / \alpha_{\text{пад}}$  определяемая стабильностью работы источника и регистрирующего устройства, не превышает 5%. Последний член в

формуле (5) в сильной мере зависит от значения знаменателя, который характеризует превышение сигнала над фоном. Для плоскопараллельных пластинок величина

$$\frac{|\Delta\alpha_{\text{расс}}| + |\Delta\alpha_{\text{фон}}|}{\alpha_{\text{расс}} - \alpha_{\text{фон}}}$$

не превосходит 5%, для полированных поверхностей эта величина еще значительно меньше.

Нетрудно показать, что фон при наличии образца не превосходит величину фона без образца, при учете всех элементов, создающих рассеянное излучение в установке. Результаты экспериментов показали, что при перемене местами фильтров 9 и 10 величина приборного фона не меняется с точностью до 1 – 3%. Из изложенного следует, что общая относительная ошибка измерения величины не превосходит 15 – 20%. Погрешность в относительном угловом распределении  $\Delta I_{\text{расс}}/F_{\text{пад}}$  (нормированные значения) значительно ниже благодаря использованию постоянного компенсационного фильтра.

На этой установке также исследовались отражательные способности различных марок алюминия. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исследование отражательной способности различных марок алюминия

Марка алюминия	Метод обработки поверхности	Вид отраженного рассеяния	Коэффициент отражения
А1М	магировка	диффузное	0,73 – 0,75
Д1АМ	термохимическая	направленное	0,87 – 0,90
Д1АМ	обработка абразивом № 240	диффузное	0,83 – 0,85

**Заключение.** В данной работе описана экспериментальная установка, позволяющая исследовать характеристики рассеяния металлических и неметаллических поверхностей. Оптимизированы функциональные элементы и системы структурной схемы установки, что позволило расширить диапазон измерения индикатрис обратного отражения различных поверхностей и ее функциональные возможности.

Выполнены измерения индикатрис рассеяния шероховатых поверхностей с крупномасштабными неоднородностями, которые искусственно созданы путем обработки поверхностей абразивами (М-100, М-180 и М-240) различной крупности. Показано, что при обработке шероховатых поверхностей этими абразивами индикатрисы обратного рассеяния носят сугубо диффузный характер и их равномерность улучшается с ростом величины  $h/\lambda$ , при этом коэффициент отражения такой поверхности падает.



Проведенные исследования показали, что равномерность индикатрисы рассеяния шероховатой поверхности зависит от поляризации зондирующего лазерного излучения и неравномерность индикатрисы рассеяния увеличивается при облучении поверхности поляризованным излучением, перпендикулярным к плоскости падения. При чем этот эффект проявляется и для неполированных плоско параллельных металлических поверхностей. Исследования характера рассеяния и отражательных характеристик алюминиевых поверхностей, покрытых различными защитными покрытиями, показали, что такие поверхности являются существенно диффузными и их коэффициент отражения зависит за вида покрытия, достигая максимального значения при термохимической обработке.

Выполненные разработки и исследования подтвердили возможность исследований разработанным методом характеристик рассеяния как металлических, так и неметаллических поверхностей в диапазоне пространственных углов обратного рассеяния до  $180^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гатиш В.А. Координатные измерительные машины. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.*
2. *Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.*
3. *Аблеков В.К., Колядин С.А., Фролов А.Ф. Высокоразрешающие оптические системы. – М.: Машиностроение, 1985. – 244 с.*
4. *Колядин А.И., Тютикова Л.П. Измерение индикатрис рассеяния // Опτικο-механическая промышленность. – 1965. – № 7. – С. 22 – 26.*
5. *Величкина Т.С. Дистанционные лазерные измерения // Труды физического института АН СССР. – 1959. – Т. 9. – С. 59.*
6. *Вагнер Е.Т., Митрофанов А.А., Барков В.Н. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.*
7. *Коронкевич В.П., Ленкова Г.А. Широкоугольные индикатрисы обратного Рассеяния // Автометрия. – 1972. – № 6. – С. 68 – 73.*
8. *Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. – М.: Наука, 1975. – 385 с.*
9. *Дианов-Клоков В.И., Палицина И.А., Стаховский АД. Специализированные узкополосные усилители с синхронным детектором // Приборы и техника эксперимента. – 1963. – № 6. – С. 89 – 92.*

*Поступила 22.03.2005*

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил.

---