

УДК 621.623

**Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко, С. В. Ковалев,  
А. Ю. Филатов, В. П. Ящук, О. А. Пригодюк** (г. Киев)  
**У. Хайзель, М. Сторчак** (г. Штуттгарт)

### **Контроль качества поверхностей неметаллических деталей при финишной алмазно-абразивной обработке**

*Описана методика измерения коэффициентов отражения и рассеяния лазерного излучения полированными поверхностями деталей из неметаллических материалов. Исследована связь между интенсивностью рассеянного света и шероховатостью полированной поверхности. Показана возможность определения колориметрических характеристик неметаллических материалов по коэффициентам рассеяния и отражения света.*

**Ключевые слова:** контроль качества, шероховатость, коэффициент отражения, спектр рассеяния света.

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность процессов финишной алмазно-абразивной обработки деталей из неметаллических материалов (естественного строительного и поделочного камня, синтетических — плавленого базальта, декоративных ситаллов, керамического гранита, стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов и т. п.), является качество обработанной поверхности. Повышение эффективности этих процессов невозможно без разработки и применения надежных методов контроля качества обработанных поверхностей, в том числе таких, которые обеспечивают возможность *in-process* мониторинга параметров шероховатости поверхностей, их рефлектометрических и колориметрических характеристик, эллипсометрических параметров и оптических постоянных, дефектности и глубины нарушенного слоя [1—3].

Финишную обработку поверхности деталей из неметаллических материалов (НМ) осуществляли при шлифовании и полировании образцов диаметром 60 мм на шлифовально-полировальном станке мод. ЗШП-350 при давлении прижима детали к инструменту  $p_a = 0,05$  МПа и частоте вращения инструмента 200 об/мин. В качестве смазывающе-охлаждающей технологической среды использовали воду. Для алмазного шлифования образцов применяли инструменты из алмазных микропорошков АСМ 40/28—10/7 и полиэтилентерефталата, а для полирования — инструменты со связанными полировальными порошками оксидов алюминия и церия, ультрадисперсного алмаза [4—5].

Для контроля обработанных поверхностей методом рефлектометрии определяют интенсивности отраженного и рассеянного света, которые зависят от шероховатости поверхности и потому могут быть использованы для оценки ее величины [6]. Для этого необходимо установить связь между шероховатостью и коэффициентами отражения и рассеяния света. Погрешности измерений этих коэффициентов могут быть незначительными, поскольку измерение интенсивности отраженного и рассеянного света значительно точнее, чем

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, В. И. СИДОРКО, С. В. КОВАЛЕВ, А. Ю. ФИЛАТОВ, В. П. ЯЩУК, О. А. ПРИГОДЮК,  
У. ХАЙЗЕЛЬ, М. СТОРЧАК, 2008

измерение малых линейных размеров механическим способом при профилометрии. Отраженный от диэлектрика свет содержит две компоненты: поверхностную (отраженный от поверхности пучок) и объемную (свет, рассеянный в объеме диэлектрика). Поверхностная компонента имеет определенную диаграмму направленности, ориентированную вдоль направления зеркального отражения от поверхности диэлектрика. Объемная компонента наблюдается в пределах телесного угла  $2\pi$ . Эти компоненты по-разному зависят от шероховатости поверхности, показателя преломления, текстуры материала и идиохроматической окраски, которая влияет на поглощение света внутри материала. Интенсивность поверхностной компоненты зависит от шероховатости поверхности и показателя преломления, но не зависит от текстуры и окраски материала. Интенсивность объемной компоненты, наоборот, не зависит от шероховатости и показателя преломления, но зависит от текстуры и идиохроматической окраски диэлектрика.

Анализ влияния шероховатости поверхности как наиболее общего параметра состояния на интенсивность и спектр отраженного света показывает, что от шероховатости зависит индикатриса поверхностной компоненты отраженного света. При увеличении шероховатости индикатриса расширяется вследствие рассеяния на неоднородностях поверхности, в результате чего интенсивность поверхностной компоненты в зеркальном направлении (зеркально отраженный пучок) падает, а в незеркальном (рассеянный свет) — возрастает. При малой шероховатости поверхности основная интенсивность сосредоточена в зеркальной составляющей. С увеличением шероховатости она быстро падает вследствие потери направленности отраженного пучка и перехода от остронаправленной индикатрисы к расширенной. При значительной шероховатости индикатриса приближается к изотропной, интенсивность зеркальной составляющей падает до уровня незеркальной (рассеянной), а изменения ее интенсивности становятся незначительными. Интенсивность незеркальной составляющей приближается к интенсивности объемной компоненты, что ухудшает отношение сигнал/шум. Поэтому наибольшей чувствительности интенсивности зеркальной составляющей к изменению шероховатости поверхности нужно ожидать при малой шероховатости характерной для полированных поверхностей.

При наблюдении отраженного излучения в незеркальном направлении регистрируются одновременно два сигнала: рассеянная составляющая поверхностной компоненты и объемная компонента. При малой шероховатости поверхности первая имеет намного меньшую интенсивность и потому ее тяжело регистрировать из-за малого соотношения сигнал/шум. При увеличении шероховатости рассеянная составляющая поверхностной компоненты по отношению к объемной возрастает. Однако при значительной шероховатости, когда индикатриса приближается к изотропной, чувствительность интенсивности рассеянной составляющей, как и зеркальной, к изменениям шероховатости теряется. Поэтому рассеянная составляющая поверхностной компоненты может быть использована для контроля умеренных значений шероховатости, характерных для тонкошлифованных поверхностей.

Спектр отраженного излучения от поверхности неметаллических материалов (НМ) является суперпозицией спектров объемной и поверхностной компонент. Спектр объемной компоненты определяется поглощением внутри материала и потому является колориметрической характеристикой материала, которая характеризует его идиохроматическую окраску. Спектр поверхностной компоненты близок к спектру источника зондирующего излучения,

поскольку это излучение отражается на всех длинах волн одинаково. В ограниченном спектральном интервале этот спектр можно считать “белым”, т. е. имеющим одинаковую интенсивность излучения на всех длинах волн. Поскольку относительный вклад объемной и поверхностной компонент зависит от шероховатости и угла наблюдения, то и общий спектр отраженного излучения НМ зависит от этих параметров. Поэтому для получения спектральной зависимости коэффициента отражения, в которой лучше всего проявляется колориметрическая характеристика материала, необходимо выбрать условия, при которых вклад объемной компоненты в общую интенсивность зарегистрированного излучения был бы максимальным.

Регистрацию спектров рассеянного излучения от поверхности образцов осуществляли с помощью экспериментальной установки (рис. 1).

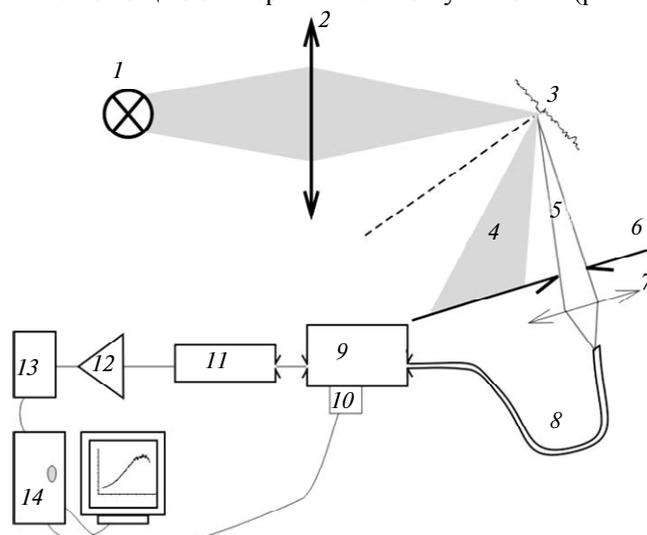


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования спектров рассеяния шлифованных и полированных поверхностей: лампа накаливания (1), линзы (2, 7), образец (3), зеркальный (4) и рассеянный (5) лучи, диафрагма (6), световод (8), монохроматор (9), шаговый двигатель (10), фотоэлектронный умножитель (11), усилитель (12), амплитудно-цифровой преобразователь (13), персональный компьютер (14).

Свет источника со сплошным спектром излучения (галогенной лампы накаливания) фокусировали на образце линзой с фокусным расстоянием 14 см. Образец был ориентирован так, чтобы зеркальная составляющая отраженного света задерживалась экраном. Угол между направлением регистрации и зеркальным направлением составлял  $30^\circ$ . Рассеянную составляющую диафрагмировали и фокусировали на входное отверстие световода, направляли на вход дифракционного монохроматора МДР-2 и регистрировали с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-136. Сигнал фотоумножителя усиливали предварительным усилителем, превращали в цифровой код амплитудно-цифровым преобразователем и записывали с помощью специальной программы записи и обработки спектров “Спектр 2” в запоминающее устройство персонального компьютера. Сканирование по длинам волн осуществляли с помощью шагового двигателя, угол поворота которого задавался ПК. Спектр записывали при последовательном измерении интенсивности рассеянного света на длинах волн, которые изменяли с постоянным шагом в видимом диапазоне 400—680 нм. Число считываний (50—100 раз) сигнала оптимизировали, исходя из минимизации погрешности и приемлемой продолжитель-

ности регистрации. Для получения спектральной зависимости коэффициента рассеяния регистрировали спектры излучения, рассеянного от образца и отраженного от эталонного алюминиевого зеркала. Спектральную зависимость коэффициента рассеяния определяли как отношение первого и второго спектров.

При исследовании зависимости интенсивности рассеянного света от шероховатости поверхности серого гранита Янцевского месторождения (Украина) показано, что шероховатость поверхности слабо влияет на интенсивность рассеяния. Это влияние в значительной мере маскируется шумом и более значительной зависимостью интенсивности от длины волны излучения. Для нейтрализации этих факторов спектры рассеянного излучения образцов с различной шероховатостью поверхности были отнесены к спектру образца с максимальной шероховатостью. Отношение  $\beta(\lambda) = I_i(\lambda)/I_{\max}(\lambda)$  (рис. 2) практически не зависит от длины волны излучения  $\lambda$ , что обусловлено фактическим отсутствием спектральной зависимости коэффициента рассеяния серого гранита при диаметре зондирующего пучка, превышающего характерное для материала расстояние, на котором изменяется его окраска. Шумы проявляются как флуктуации величины  $\beta$ , и составляют  $\sim 1-2\%$ .

Устранение влияния спектральной зависимости позволяет считать эти шумы равнозначными независимо от  $\lambda$  и провести усреднение величины  $\beta$  по всему спектру, который дает погрешность в определении отношения  $< 0,5\%$ . В этом случае спектральные точки выступают как статистические данные для

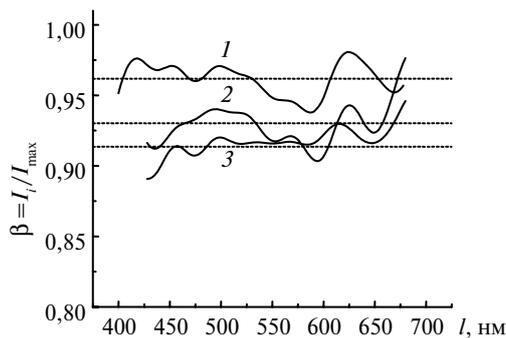


Рис. 2. Отношение спектров рассеянного излучения поверхностей образцов серого гранита к спектру поверхности максимальной шероховатости ( $R_{\max} = 0,353$  мкм):  $R_z = 0,31$  (1),  $0,22$  (2),  $0,15$  (3) мкм.

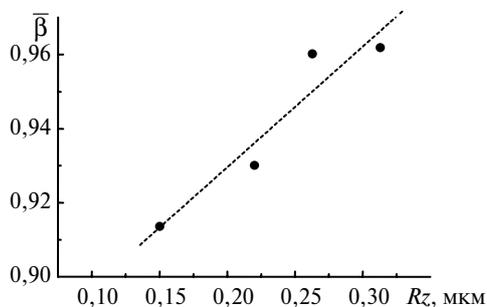


Рис. 3. Зависимость средней величины отношения спектров рассеянного излучения от параметра шероховатости.

определения  $\bar{\beta}$ . На рис. 3 приведена зависимость величины  $\bar{\beta}$  от параметра шероховатости поверхности  $R_z$ , из которой следует, что, несмотря на малые изменения интенсивности рассеянного света и достаточный шум в спектрах, флуктуации величины  $\beta$  минимальны. Это позволяет уверенно фиксировать изменение этой величины, составляющее  $\sim 0,5\%$ . Отношение  $\beta$  линейно возрастает с увеличением шероховатости. Зависимость  $\bar{\beta}(R_z)$  демонстрирует принципиальную возможность использования изменения интенсивности рассеянного света для контроля шероховатости поверхности полированных образцов.

На рис. 4, 5 приведены спектры отражения и рассеянного излучения поверхностью красной яшмы в зависимости от условий наблюдения. При наблюдении в направлении зеркального отражения (см. рис. 4, а) ко-

лориметрическая характеристика материала практически не проявляется — в отраженном свете доминирует интенсивная зеркальная составляющая поверхностной компоненты и спектр рассеянного (отраженного) света является “белым”.

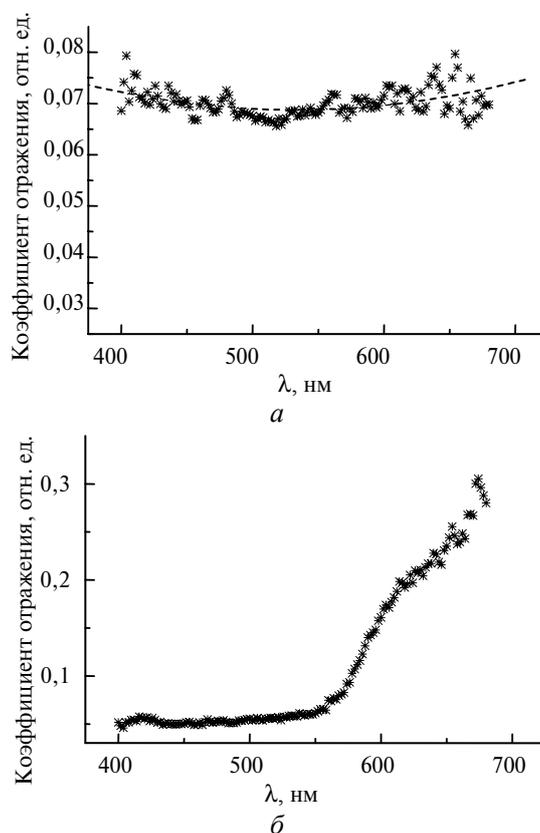


Рис. 4. Коэффициент отражения в зеркальном направлении образцов яшмы с полированной (а) и шлифованной (б) поверхностями.

При наблюдении в незеркальном направлении (см. рис. 5) колориметрическая характеристика хорошо проявляется. В этом направлении поверхностная компонента рассеянного излучения слабая, а доминирует объемная компонента. При увеличении шероховатости поверхности (шлифованная поверхность образца) интенсивность поверхностной рассеянной компоненты существенно возрастает и дает заметный вклад в общий спектр в виде пьедестала. Из приведенных данных следует, что при приближении к направлению зеркального отражения общий спектр рассеянного излучения становится более “белым”, поскольку возрастает вклад поверхностной компоненты. При фиксированном угле наблюдения далеко от направления зеркального отражения с уменьшением шероховатости поверхности общий спектр рассеянного излучения становится менее “белым”, поскольку вклад поверхностной компоненты падает. Поэтому для нахождения спектральной зависимости коэффициента отражения, которая определяет колориметрическую характеристику материала, регистрацию отраженного света следует проводить в незеркальном направлении. Спектры рассеянного от шлифованной поверхности

излучения практически не зависят от направления наблюдения, поэтому при их регистрации оно не играет существенной роли.

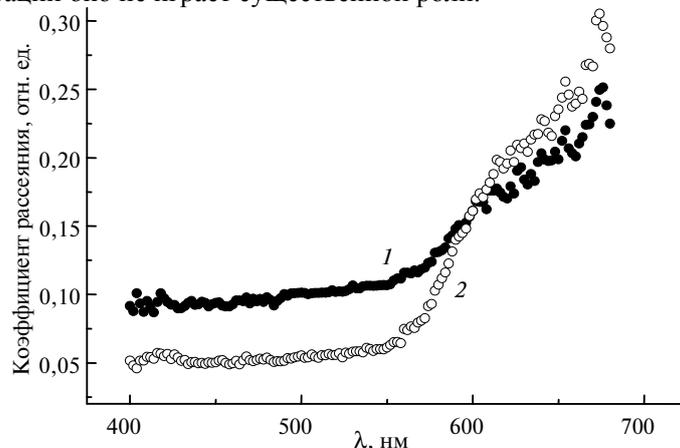


Рис. 5. Спектры рассеяния шлифованной (1) и полированной (2) поверхностей яшмы.

### Выводы

Разработана установка и методы регистрации коэффициента отражения полированных поверхностей деталей из неметаллических материалов и определения их колориметрических характеристик.

Показана принципиальная возможность и созданы предпосылки для разработки экспресс-метода ориентировочной оценки шероховатости полированных поверхностей.

Представляет интерес использование зависимости  $\bar{\beta}(Rz)$  для контроля качества обработки полированных поверхностей изделий из природного и синтетического камня и других НМ.

Получен достаточный объем экспериментальных данных и сформирована база для изучения зависимости коэффициентов рассеяния и отражения полированных поверхностей деталей из НМ от параметров их шероховатости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (проекты № Ф25/691-2007, № М/55-2008).

1. Сидорко В. И., Филатов А. Ю. Состояние полированных поверхностей изделий из природного и синтетического камня // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2006. — Вып. 9. — С. 365—368.
2. Skryabin V. V., Filatov Yu. D., Sidorko V. I., Yashchuk V. P. The control of quality parameters of polished surfaces of articles from silica-alumina materials // Problems of Optics and High Technology Material Science SPO 2004: Sci. Works 5th Int. Young Sci. Conf., Kyiv, Ukraine, 28—31 Oct., 2004. — Kyiv: Taras Shevchenko Kyiv National University. — P. 60.
3. Filatov A. Yu., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Appl. Surf. Sci. — 2006. — **253**, N. 1. — P. 163—166.
4. Rogov V. V., Filatov Yu. D., Kottler W., Sobol V. P. New technology of precision polishing of glass optic // Opt. Eng. — 2001. — **40**, N 8. — P. 1641—1645.
5. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. — 2001. — № 3. — С. 36—49.
6. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. — Л.: Машиностроение, 1988. — 191 с.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины  
Киевский национальный ун-т им. Тараса Шевченко  
Штуттгартский университет (Германия)

Поступила 22.01.08