

УДК 621.623

**Ю. Д. Филатов, В. П. Ящук, А. Ю. Филатов** (г. Киев)

**У. Хайзель, М. Сторчак** (г. Штутгарт, Германия)

**Ги Монтей** (г. Безансон, Франция)

## **Оценка шероховатости и отражательной способности поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной алмазно-абразивной обработке**

*Показано, что шероховатость поверхностей, которые образуются на различных технологических операциях финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов, определяет их угловые диаграммы отражения и рассеяния, характеризующиеся спекловой структурой. Установлено, что индикатриса рассеяния формируется за счет отражения света однородными участками текстурных образований на поверхности и их границами. Параметром, который реагирует на изменение шероховатости обработанных поверхностей, является ширина пика в индикатрисе рассеяния на фоне практически неизменного пьедестала.*

***Ключевые слова:** шероховатость поверхности, шлифование, полирование, угловые диаграммы отражения и рассеяния света, индикатриса рассеяния.*

**Введение.** При полировании поверхности деталей из неметаллических материалов важнейшей задачей является контроль шероховатости обработанной поверхности, которая количественно характеризует качество обработки. Для этой цели используют методы профилометрии [1, 2] и атомно-силовой микроскопии [3, 4], которые позволяют получать детальную характеристику профиля обработанной поверхности. Однако в некоторых случаях необходимо исследовать не конкретный профиль обработанной поверхности, а усредненную (интегральную) характеристику ее шероховатости. В таких случаях могут быть использованы оптические методы контроля шероховатости.

Ранее авторами [5, 6] была экспериментально установлена связь коэффициентов отражения и рассеяния света обработанной поверхностью природных неметаллических материалов с параметрами ее шероховатости. Уменьшение шероховатости поверхности приводит к уменьшению коэффициента рассеяния и увеличению коэффициента отражения на единицы или десятые доли процента (в зависимости от шероховатости), что надежно фиксировали экспериментально. Однако очевидно, что изменение этих коэффициентов обусловлено соответствующими изменениями диаграммы отражения (или рассеяния) обработанных поверхностей. Поэтому существует принципиальная возможность судить об усредненной шероховатости поверхности по форме ее диаграммы отражения (рассеяния), что дает дополнительные возможности контроля этого важного параметра. В связи с этим представляет интерес исследование зависимости формы диаграммы отражения (рассеяния)

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, В. П. ЯЩУК, А. Ю. ФИЛАТОВ, У. ХАЙЗЕЛЬ, М. СТОРЧАК, ГИ МОНТЕЙ, 2009

от шероховатости обработанной поверхности. Такие исследования проводили для деталей из оптического стекла. Однако в отличие от стекла природным неметаллическим материалам присуща неоднородность, которая проявляется в текстуре обработанной поверхности после любой из операций ее обработки, являясь причиной дополнительного рассеяния света. Поэтому диаграммы отражения природных неметаллов должны отличаться от исследованных ранее для оптического стекла, в связи с чем разработка методики и проведение таких исследований являются насущной потребностью.

С другой стороны, качество полирования зависит от характеристик применяемого абразивного инструмента, одним из важных параметров которого является равномерность распределения абразивных частиц [7, 8]. Неравномерность их распределения может привести к образованию дефектов на обработанной поверхности, в частности, „ласин” или недополированных участков. Указанное обуславливает необходимость поиска новых методов контроля данного распределения, которое было предложено оценивать по влиянию многократного рассеяния света на форму спектров люминесценции и возбуждения органических красителей, специально введенных с этой целью в связку инструмента [9]. Однако развитие представлений о многократном рассеянии обеспечивает принципиальную возможность контроля, который базируется на принципиально новом эффекте — обратном когерентном рассеянии света, который наблюдается, в частности, в концентрированных жидких суспензиях мелкодисперсных частиц [10]. Поскольку инструмент для финишной обработки неметаллических материалов фактически является твердой суспензией частиц, он близок по своим свойствам к таким суспензиям и проявление указанного эффекта можно ожидать в связке инструмента. Исследование условий возникновения этого эффекта в инструменте особенно целесообразно в случае, когда используемая полимерная связка не допускает введения в нее органического красителя.

**Методика исследований.** Установка для регистрации диаграмм отражения и рассеяния света смонтирована на базе стандартного гониометра Г5 [1, 2] (рис. 1). Луч от источника зондирующего излучения — полупроводникового лазера (длина волны  $\lambda = 618$  нм) проходит через диафрагму, отражается от светоделительной пластины и направляется на исследуемую поверхность образца, закрепленного в держателе. После отражения от поверхности образца, закрепленного на вибраторе держателя, излучение проходит через светоделительную пластину, угловой анализатор и световод. Далее луч попадает на вход двойного монохроматора ДМР-4, настроенного на длину волны излучения лазера, после прохождения которого — на фотоэлектронный умножитель ФЭУ-136. Сигнал ФЭУ после усиления в усилителе постоянного тока превращается в числовой код амплитудно-цифровым преобразователем и записывается в файл данных на персональном компьютере. После записи значения сигнала происходит управляемый поворот алидады гониометра на заданный угол с помощью шагового двигателя с блоком управления. Управление поворотом алидады гониометра, запись и обработку данных осуществляют в соответствии с заданными параметрами при помощи специальной программы. Она задает шаг и пределы сканирования по углу, коэффициент усиления усилителя, необходимое количество считываний сигнала при каждом значении угла, определяет величину шумового сигнала, вычитает его от амплитуды сигнала, записывает данные и выводит параметры регистрации и угловую диаграмму отражения (рассеяния) на дисплей. Угол наблюдения рассеянного излучения определяют при помощи измерительного механизма

гонометра. Для уменьшения влияния спекловой структуры поля отраженного и рассеянного излучения на диаграмму отражения перед угловым анализатором размещают прозрачный пластмассовый диск обтюлятора. При регистрации диаграмм рассеяния вместо диска используют электровибратор, на котором закрепляют исследуемый образец. И вращение диска в пучке отраженного света, и вибрация образца обуславливают периодические изменения оптической разности хода интерферирующих пучков, которые приводят к осцилляции спекловой структуры светового поля относительно входной щели углового анализатора с частотой 100 Гц, вследствие чего интенсивность рассеянного света усредняется по спеклам.

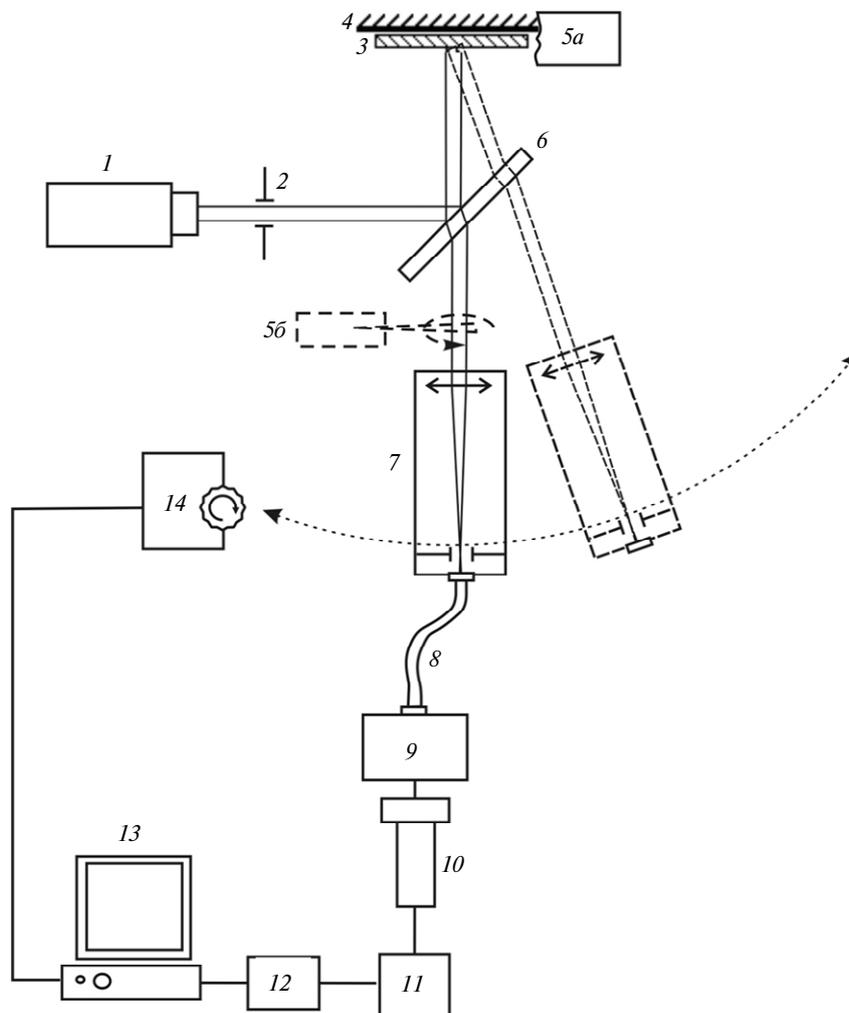


Рис. 1. Схема установки для регистрации угловой диаграммы отражения и рассеяния: 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3 — образец; 4 — держатель образца с юстировочным механизмом; 5а — вибратор, 5б — обтюратор, 6 — плоскопараллельная пластинка; 7 — угловой анализатор; 8 — световод; 9 — монохроматор; 10 — ФЭУ; 11 — усилитель постоянного тока; 12 — АЦП; 13 — ПК; 14 — шаговый двигатель.

Для проведения исследований были изготовлены образцы диаметром 60 мм и толщиной 8—12 мм из гранитов разного цвета и текстуры: серого (Янцевского месторождения, Украина) и красного (Токовского месторожде-

ния, Украина), а также из оптического стекла марки К8. Для получения поверхностей с различной шероховатостью их подвергали финишной алмазно-абразивной обработке на различных технологических операциях: алмазном шлифовании (АШ), тонком (ТАШ) и супертонком (СТАШ) алмазном шлифовании, а также полировании с применением инструмента со связанным абразивом типа АКВАПОЛ [11]. Параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  обработанных поверхностей указанных образцов определяли методом профилометрии с помощью профилографа-профилометра мод. "Mitutoyo" (табл. 1 и 2).

**Таблица 1. Экспериментальные значения параметров шероховатости обработанных поверхностей образцов из гранита**

Граниты	Параметры шероховатости, мкм	Операция обработки, характеристика алмазного порошка в инструменте				
		ТАШ, АСМ 40/28	ТАШ, АСМ 20/14	СТАШ, АСМ 10/7	СТАШ, АСМ 2/1	Полирование
Серый (Янцевское месторождения, Украина)	$Ra$	0,20	0,14	0,09	0,09	0,01
	$Rz$	0,35	0,31	0,26	0,22	0,15
	$Rmax$	0,84	0,75	0,56	0,47	0,25
Красный (Токовское месторождения, Украина)	$Ra$	0,25	0,18	0,07	0,03	0,01
	$Rz$	0,43	0,39	0,28	0,19	0,16
	$Rmax$	1,26	0,93	0,54	0,29	0,26

**Таблица 2. Экспериментальные значения параметров шероховатости обработанных поверхностей образцов из стекла К8**

Параметры шероховатости, мкм	Операция обработки, характеристика алмазного порошка в инструменте						
	АШ, АС6 125/100	АШ, АС6 80/63	ТАШ, АСМ 40/28	ТАШ, АСМ 20/14	СТАШ, АСМ 10/7	СТАШ, АСМ 7/5	Полирование
$Ra$	0,78	0,23	0,07	0,05	0,02	0,02	0,01
$Rz$	3,20	1,44	0,73	0,45	0,18	0,20	0,05
$Rmax$	4,64	2,09	1,05	0,65	0,26	0,29	0,07

Угловые диаграммы отражения поверхностей гранитов исследовали при двух углах падения зондирующего луча — 0 и 45°, а стекла К8 — при 45°. При отладке методики регистрации угловых диаграмм отражения особое внимание уделяли максимальному устранению попадания рассеянного в угловом анализаторе света на его выход. Это особенно важно при регистрации рассеянной составляющей диаграммы отражения образцов с малой шероховатостью поверхности.

Проверку влияния рассеянного в угловом анализаторе света на диаграмму отражения осуществляли путем регистрации диаграммы отражения от эталонной поверхности стекла марки К8, обработанной по 14 классу оптической чистоты с отклонением от плоскостности меньше  $\lambda/10$  при ориентации оптической оси углового анализатора вдоль плоскости хода лучей — плоскости зеркального отражения (рис. 2) и при ее разъюстировании относительно этой

плоскости на углы  $\alpha = 2', 4'$  и  $6'$ , что соответствует угловой разрешающей способности углового анализатора и превышает ее вдвое или втрое (рис. 3, 4). В последнем случае прямой пучок полностью рассеивается в угловом анализаторе. Реальное соотношение высот максимумов диаграмм для углов  $0', 2', 4'$  и  $6'$ , представленных на рис. 3, составляет  $1:0,3:0,019:0,0025$ .

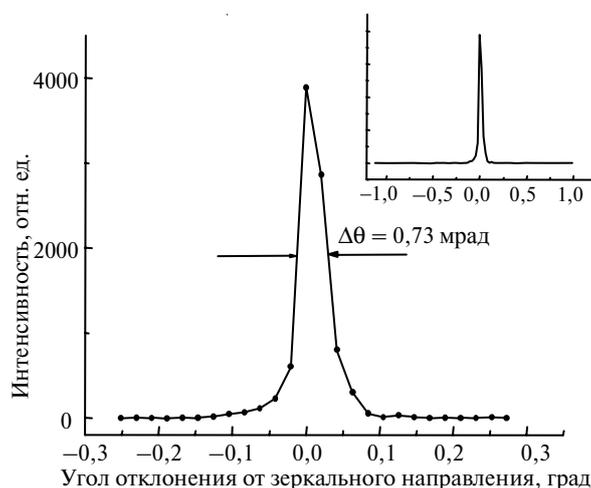


Рис. 2. Угловая диаграмма отражения эталонной поверхности при ориентации оси углового анализатора в плоскости хода лучей вблизи максимума (основной рисунок) и в широком диапазоне (вставка).

Из рис. 2 следует, что вклад рассеянного в угловом анализаторе света в угловую диаграмму рассеяния при ориентации оси анализатора вдоль плоскости зеркального отражения практически не проявляется. Угловая ширина диаграммы отражения составляет  $\delta\theta = 0,73$  мрад ( $2'$ ), что приблизительно соответствует угловой разрешающей способности углового анализатора.

При отклонении оси анализатора от плоскости зеркального отражения высота максимума диаграммы отражения быстро падает (рис. 3) и при трехкратном превышении ( $6'$ ) угловой ширины диаграммы отражения ( $2'$ ) составляет  $0,25\%$  ее величины в плоскости зеркального отражения. Форма диаграммы рассеяния при этом остается практически неизменной (рис. 4). Лишь при наибольшем угле ( $\alpha = 6'$ ) появляется едва заметный широкий пьедестал, высотой менее  $5\%$  от максимума пика диаграммы, которая представляет  $\sim 0,01\%$  от высоты максимума диаграммы в плоскости зеркального отражения. Большая угловая ширина пьедестала свидетельствует о том, что он обусловлен рассеянием на большие углы, которое, вероятно, происходит на начальном участке углового анализатора. Таким образом, можно считать, что угловой анализатор ослабляет рассеянное излучение в  $10^4$  раз. Неизменность формы основного пика диаграммы рассеяния (см. рис. 4) свидетельствует, что рассеяние на заключительном участке углового анализатора незначительно влияет на его форму, что позволяет, изменяя наклон анализатора, подавлять пик зеркального отражения и регистрировать диаграммы рассеяния образцов. В частности, при трехкратном превышении отклонения оптической оси анализатора реальной разрешающей способности можно регистрировать диаграммы рассеяния образцов на фоне пика зеркального отражения, который превышает высоту диаграммы рассеяния приблизительно в 400 раз.

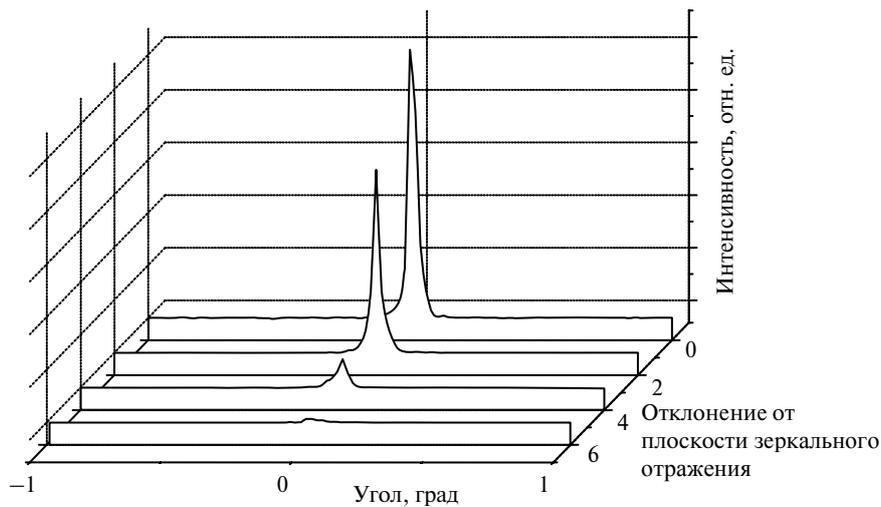


Рис. 3. Угловые диаграммы отражения эталонной поверхности при отклонении оси углового анализатора от плоскости зеркального отражения на углы  $0'$ ,  $2'$ ,  $4'$  и  $6'$ .

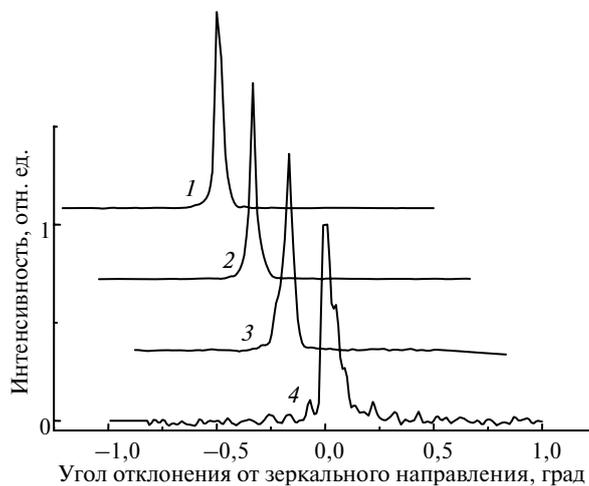


Рис. 4. Нормированные угловые диаграммы отражения эталонной поверхности при ориентации оси углового анализатора под углом  $0'$  (1),  $2'$  (2),  $4'$  (3) и  $6'$  (4) относительно плоскости зеркального отражения.

В соответствии с этим регистрировали диаграммы отражения (ориентация оси углового анализатора  $\alpha = 0^\circ$ ) и рассеяния ( $\alpha = 3\delta\theta$ ) обработанных поверхностей каждого образца по три раза для двух различных участков. Для устранения шума полученные диаграммы сглаживали путем устранения высокочастотных компонентов из Фурье преобразования экспериментальных кривых. Итоговую диаграмму отражения получали усреднением сглаженных кривых.

**Угловые диаграммы отражения и рассеяния поверхностей.** Диаграммы отражения обработанной поверхности гранита (оптическая ось углового анализатора в плоскости зеркального отражения) имеют довольно сложный характер из-за спекловой структуры поля отраженного излучения, влияние которой смягчается благодаря использованию обтюратора, но полностью не устраняется. При углах падения зондирующего луча — нормальном и  $45^\circ$

диаграммы состоят из низкого и относительно широкого пьедестала и высокого и узкого пика (рис. 5, 6). Пик и пьедестал обусловлены соответственно зеркально отраженным и рассеянным поверхностью образца излучением. На эту общую картину накладываются пики, обусловленные интерференционными полосами (спеклами). Вблизи зеркального пика спеклы группируются в скопления, которые наблюдаются и при визуальном рассмотрении поперечного сечения пучка в окуляр. Именно эти скопления проявляются в виде пиков на диаграмме отражения.

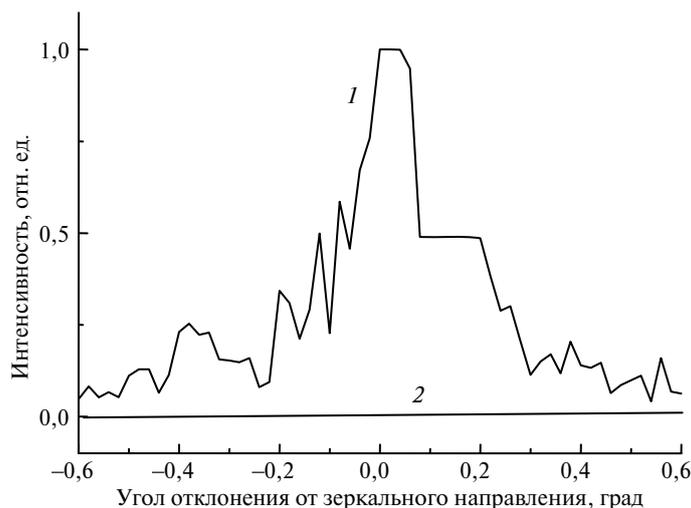


Рис. 5. Диаграмма отражения шлифованной поверхности красного гранита с  $Ra = 0,25$  мкм (1) при угле падения зондирующего пучка  $0^\circ$  и выделенный из нее пьедестал (2).

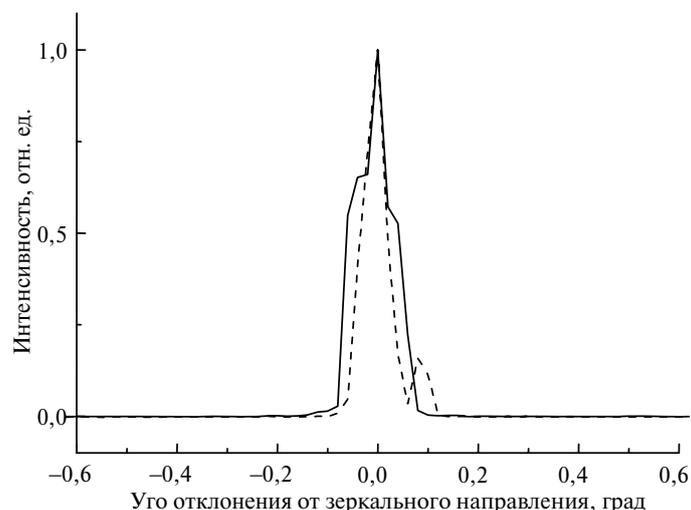


Рис. 6. Диаграмма отражения полированной поверхности красного гранита с  $Ra = 0,01$  мкм при угле падения зондирующего пучка  $45^\circ$ . Пунктирная и сплошная линии соответствуют различным участкам поверхности образца.

Ширина зеркального пика отражения при уменьшении шероховатости поверхности проявляет тенденцию к сужению, которая маскируется наложением интерференционных пиков, вследствие чего ширина зеркального пика колеблется относительно этого тренда. Сужение пика более четко проявляет-

ся при относительно больших шероховатостях. Так, при нормальном падении зондирующего луча наблюдается четырехкратное сужение пика при уменьшении  $Ra_{cp}$  от 0,25 до 0,07 мкм, а при падении под углом  $45^\circ$  — трехкратное в пределах  $Ra = 0,17—0,25$  мкм. Однако при любых значениях параметров шероховатости ширина зеркального пика в несколько раз превышает угловую разрешающую способность углового анализатора из-за наложения пиков.

Существование скоплений спеклов и, соответственно, пиков в диаграмме отражения обусловлено наличием в отраженном свете нескольких пучков, на которые разделяют зондирующий пучок границы текстурных образований на полированной поверхности гранита, отчетливо наблюдаемые при небольшом увеличении. Ширина выделенного из диаграммы отражения пьедестала монотонно уменьшается от  $50'$  до  $10'$  в диапазоне  $Ra = 0,25—0,01$  мкм. Темп сужения пьедестала с уменьшением шероховатости существенно неравномерный: основное сужение происходит при шероховатостях  $Ra = 0,25—0,17$  мкм, а при дальнейшем уменьшении шероховатости оно незначительно (рис. 7 а, б). Зависимость полуширины  $\Delta$  пика (ширины пьедестала на уровне 0,5 максимальной интенсивности) от шероховатости поверхности может быть описана зависимостью  $\Delta(Ra) = \Delta_0 \exp[Ra/Ra_0]$  ( $\Delta_0 = 0,17$  град ( $10'$ ) — полуширина пьедестала диаграммы отражения идеальной поверхности гранита,  $Ra_0 = 0,17$  мкм — предельное значение шероховатости, до достижения которой происходит существенное сужение пьедестала).

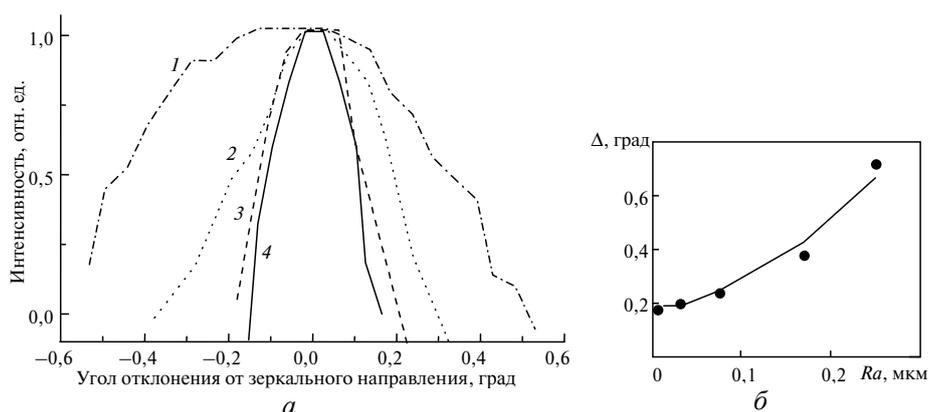


Рис. 7. Сужение пьедестала диаграммы отражения при уменьшении шероховатости:  $Ra = 0,25$  (1),  $0,17$  (2),  $0,075$  (3),  $0,035$  (4) мкм.

На рис. 8 и 9 приведены индикатрисы рассеяния поверхностей красного и серого гранитов, полученные при углах отклонения оптической оси углового анализатора от плоскости зеркального отражения  $\alpha = 3\delta\theta$  и угле падения зондирующего пучка  $45^\circ$ . В приведенную серию кривых не включена индикатриса рассеяния поверхности с максимальной шероховатостью, поскольку она намного шире, чем другие. Из приведенных кривых видно, что все индикатрисы рассеяния состоят, как и диаграммы отражения, из пьедестала и более узкого пика. Достаточно большой шум не позволяет провести достоверное разделение пика и пьедестала, хотя спекловая структура значительно меньше проявляется на индикатрисах рассеяния, чем на диаграммах отражения (см. рис. 5, 6). Кроме того, следует отметить, что при переходе к полированным поверхностям пик в индикатрисе рассеяния выделяется на фоне пьедестала заметно четче.

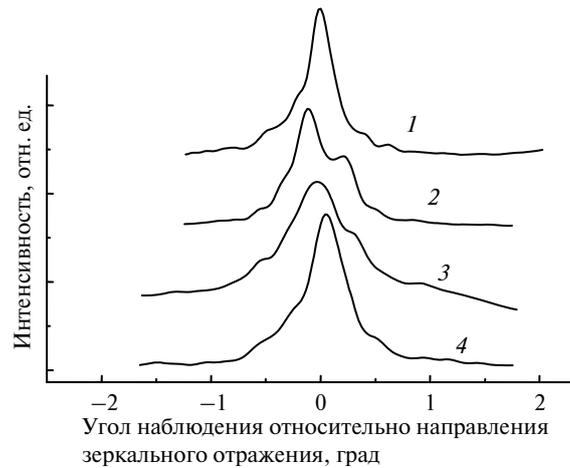


Рис. 8. Индикатрисы рассеяния поверхностей красного гранита ( $\alpha = 6'$ ) в зависимости от их шероховатости:  $Ra = 0,17$  (1),  $0,07$  (2),  $0,03$  (3),  $0,01$  (4) мкм.

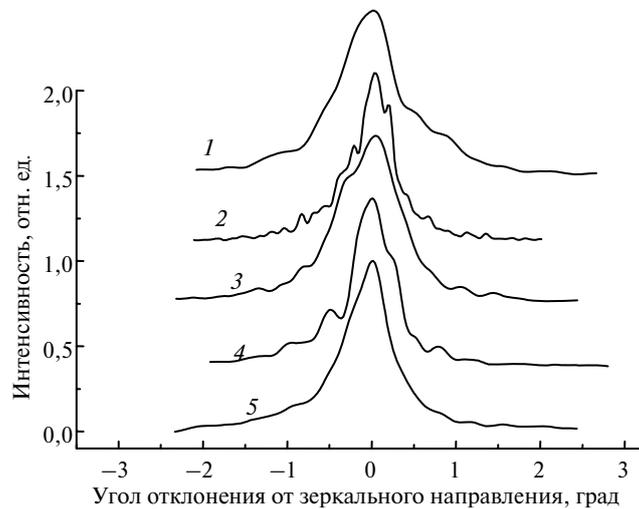


Рис. 9. Индикатрисы рассеяния поверхностей серого гранита ( $\alpha = 6'$ ) в зависимости от их шероховатости:  $Ra = 0,20$  (1),  $0,14$  (2),  $0,10$  (3),  $0,09$  (4),  $0,01$  (5) мкм.

Приведенные данные отражают особенности строения поверхности гранита, подтверждением чего являются индикатрисы рассеяния поверхности оптического стекла марки К8, которые зарегистрированы в аналогичных условиях (рис. 10). В них наблюдается четко выраженное резкое (больше чем в 30 раз) сужение индикатрисы от  $1^{\circ}50'$  до  $3'$  в диапазоне  $Ra = 0,25—0,05$  мкм. При этом ширина пика индикатрисы практически уравнивается с шириной пика зеркального отражения. Это резко контрастирует со слабой зависимостью индикатрисы рассеяния гранита от шероховатости. Вид индикатрисы рассеяния стекла свидетельствует об отсутствии скоплений спеклов, хотя сама спекловая картина пучка существует.

Причиной различия индикатрис рассеяния поверхностей гранитов и оптического стекла от параметра шероховатости  $Ra$  является качественно различная структура их поверхности. Поверхность стекла однородная, а гранитов — текстурная. Рассеяние на поверхности гранита имеет две составляющих — на границах текстурных образований и на относительно однородных участках

между этими границами. Первая из них обуславливает рассеяние на большие углы и образование пьедестала индикатрисы рассеяния, расширяющее ее. Она присутствует на всех операциях обработки поверхности и потому относительно слабо зависит от ее шероховатости на участках между границами. Вторая составляющая рассеяния зависит от шероховатости, она формирует более узкий пик в индикатрисе рассеяния, ширина которого уменьшается при уменьшении  $Ra$ . Совокупное действие этих составляющих приводит к тому, что с уменьшением шероховатости изменяется, в основном, лишь форма индикатрисы — пик на фоне практически неизменного пьедестала становится более резким.

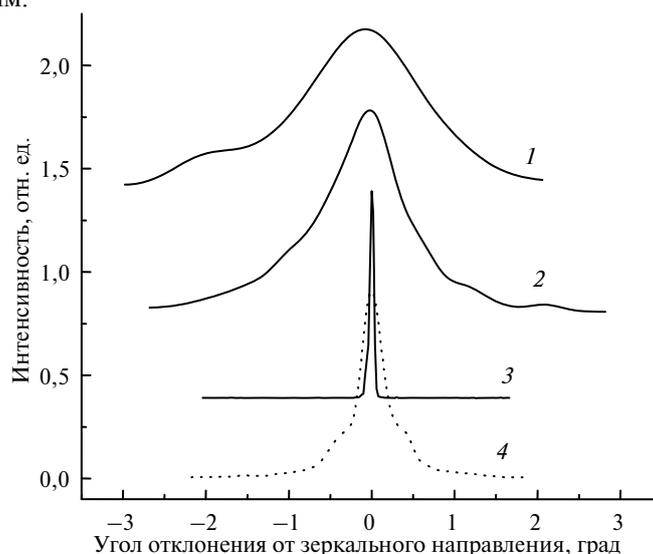


Рис. 10. Индикатрисы рассеяния поверхностей оптического стекла марки К8 ( $\alpha = 6'$ ) в зависимости от их шероховатости:  $Ra = 0,25$  (1),  $0,07$  (2),  $0,05$  (3),  $0,02$  (4) мкм.

При дальнейшем уменьшении шероховатости поверхности оптического стекла происходит существенное изменение формы индикатрисы рассеяния, в ней появляется пьедестал, на фоне которого возникает расширенный пик. Это является следствием обострения диаграммы отражения по мере уменьшения величины  $Ra$ , вследствие чего резко уменьшается интенсивность сигнала, который проходит на выход углового анализатора при отклонении его оптической оси от плоскости зеркального отражения. В результате интенсивность сигнала снижается до уровня интенсивности рассеянного в угловом анализаторе излучения, что обуславливает возникновение пьедестала. В то же время на выход углового анализатора попадает рассеянное излучение, увеличивая ширину основного пика. Из этого следует, что при регистрации индикатрисы рассеяния существуют оптимальные углы наклона оптической оси углового анализатора относительно плоскости зеркального отражения. Величина угла выбирается из соображений наилучшего подавления зеркального пика при достаточной интенсивности рассеянного на данный угол излучения.

На рис. 11 приведены снимки поверхности исследуемых образцов после СТАШ и полирования. Темные участки на них отвечают границам текстурных образований. Микроскопические исследования показывают, что эти границы имеют вид канавок и отдельных углублений. При обработке поверхностей алмазно-абразивными инструментами уменьшается шероховатость од-

нородных участков, а также глубина и площадь этих канавок и углублений, а их контуры становятся более четкими (см. рис. 11).

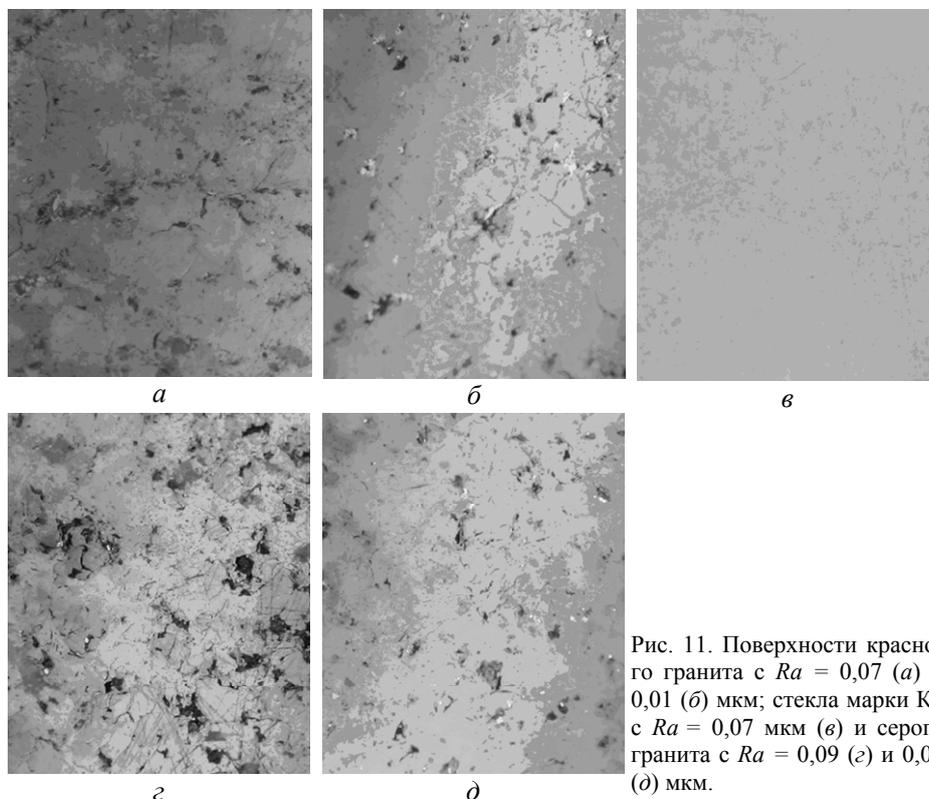


Рис. 11. Поверхности красного гранита с  $Ra = 0,07$  (а) и  $0,01$  (б) мкм; стекла марки К8 с  $Ra = 0,07$  мкм (в) и серого гранита с  $Ra = 0,09$  (г) и  $0,01$  (д) мкм.

Необходимо отметить, что даже при глубоком полировании эти канавки и углубления не исчезают. Таким образом, поверхность гранита обрабатывается неодинаково: шероховатость однородных участков уменьшается, а границы не выполировываются, уменьшается лишь их площадь. Это приводит к тому, что рассеяние границ дает вклад в индикатрису рассеяния при любой операции обработки поверхности гранита, формируя широкий пьедестал, ширина которого практически не зависит от шероховатости характерной для однородных участков. Неустранимость канавок и углублений на границах текстурных образований отличает граниты и другие природные неметаллические материалы от оптического стекла, индикатриса рассеяния которого содержит лишь один пик, с шириной существенно зависимой от шероховатости поверхности.

Приведенные результаты свидетельствуют, что известная зависимость параметров диаграмм отражения (рассеяния) от шероховатости поверхности однородных материалов не пригодна для контроля качества поверхности природных неметаллических материалов. Параметром, который реагирует на изменение их шероховатости, является ширина пика, который наблюдается в индикатрисе рассеяния на фоне практически неизменного пьедестала.

### Выводы

Разработана методика и создан макет автоматизированной установки для регистрации угловых диаграмм отражения и рассеяния поверхностей деталей из природных неметаллических материалов.

Показано, что угловая разрешающая способность установки не хуже  $2'$ , степень подавления рассеянного в угловом анализаторе света и подавления рассеянного зеркально отраженного пучка при наклоне оптической оси углового анализатора не менее 400 при угле наклона  $6'$ , что обеспечивает возможность регистрации индикатрис рассеяния полированных поверхностей на фоне их пика зеркального отражения.

Установлено, что при регистрации индикатрис рассеяния обработанных поверхностей существует оптимальное направление наблюдения, которое можно выбирать, изменяя наклон оптической оси углового анализатора по отношению к плоскости зеркального отражения пучка.

При исследовании влияния шероховатости поверхности на угловые диаграммы отражения и рассеяния установлено, что диаграммы отражения поверхности гранитов состоят из узкого пика и пьедестала, а также пиков, обусловленных скоплением спеклов. Их индикатрисы рассеяния по-разному зависят от шероховатости поверхности, что обусловлено наличием текстуры поверхности гранитов, вследствие чего индикатриса рассеяния формируется двумя составляющими: отражением (рассеянием) относительно однородных участков текстурных образований на поверхности гранита и рассеянием на границах, ограничивающих эти участки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (проекты № М/55-2008, № М/126-2009).

1. Поперенко В. Л., Філатов Ю. Д. Технологія обробки оптичних поверхонь. — Київ: ВПЦ “Київський ун-т”, 2004. — 165 с.
2. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. — Л.: Машиностроение, 1988. — 191 с.
3. Sarid D. Scanning force microscopy: Oxford series in optical and imaging sciences. — New York: Oxford University Press, 1994. — 263 p.
4. Giessibl F. Advances in atomic force microscopy // Rev. Modern Physics. — 2003. — 75, N 3. — P. 949—983.
5. Filatov Yu. D., Sidorko V. I., Kovalev S. V. et al. Control of the surface quality of non-metal parts in diamond-abrasive finishing // J. Superhard materials. — 2008. — N 3. — P. 75—80.
6. Філатов Ю. Д., Сидорко В. І., Ковалев С. В. и др. Оценка качества обработанных поверхностей деталей из неметаллических материалов // Наук. праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. — Донецьк: ДонНТУ, 2008. — Вип. 5 (139). — С. 127—133.
7. Filatov Yu. D., Sidorko V. I., Filatov A. Yu. et al. Reflectometry of surfaces of non-metallic materials at polishing // Proc. of 9th Int. Young Sci. Conf. “Optics and High Technology Material Science. SPO 2008”, Kyiv, Ukraine, 23—26 Oct., 2008. — Kyiv, 2008. — P. 68.
8. Filatov Yu. D. Polishing of precision surfaces of non-metallic material products by tools with bounded polishing powder // J. Superhard materials. — 2008. — N 1. — P. 59—66.
9. Yashchuk V. P., Prygodiuk O. A. Dependence of luminescence and excitation spectra on multiply scattered dyed medium parameters // Proc. of 9th Int. Young Sci. Conf. “Optics and High Technology Material Science. SPO 2008”, Kyiv, Ukraine, 23—26 Oct., 2008. — Kyiv, 2008. — P. 71.
10. Kuga Y., Ishimaru A. Retroreflectance from a dense distribution of spherical particles // J. Opt. Soc. Am. A. — 1984. — 1, N 8. — P. 831—835.
11. Rogov V. V., Filatov Y. D., Kottler W., Sobol V. P. New technology of precision polishing of glass optic // Optical Eng. — 2001. — 40, N 8. — P. 1641—1645.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Киевский национальный ун-т  
им. Тараса Шевченко

Штуттгартский ун-т

Национальная высшая школа механики  
и микротехники

Поступила 15.06.09