

УДК 535.016

## ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

О.В. БОЙПРАВ, Д.В. СТОЛЕР, Т.В. БОРБОТЬКО, А.А. КАЗЕКА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 декабря 2012

Проведен анализ влияния параметров компонентов, а также составляющих микрорельефа поверхности композитных материалов на их спектральную яркость и степень поляризации.

*Ключевые слова:* индикатриса рассеяния, композитные материалы, коэффициент спектральной яркости, микрорельеф, микрометр, степень поляризации.

### Введение

Композитные материалы (композиты) представляют собой многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (связующего), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью и/или жесткостью. Сочетание разнородных веществ в них приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам (удельной и усталостной прочности, жесткости, износоустойчивости), и при этом характеризуются более низкими массогабаритными параметрами и свойством размеростабильности (способностью сохранять свои размеры при температурных, механических либо химических воздействиях). В силу этого в настоящее время композитные материалы широко используются в отраслях обрабатывающей промышленности [1]. Варьируя набор и соотношение компонентов композитного материала, возможно варьировать его механические характеристики, массогабаритные параметры, а также оптические свойства, которые являются весьма значимыми при изготовлении стекол, дисплеев приборов, маскирующих конструкций для военной техники и т.д. Одними из наиболее характерных оптических свойств композитных материалов являются коэффициент спектральной яркости (КСЯ) и степень поляризации отраженного излучения. КСЯ представляет собой величину, которая характеризует пространственное распределение спектральной яркости отражающей поверхности и равна отношению яркости данной поверхности в заданном направлении к яркости эталонной рассеивающей поверхности (например, молочного стекла) с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и данная поверхность. Степень поляризации света соотносит поляризацию изучаемой световой волны с поляризацией линейно поляризованного света. Наряду с соотношением компонентов композитного материала, значительное влияние на его оптические свойства оказывает микрорельеф его поверхности, представляющий собой совокупность шероховатостей, формируемых частицами наполнителя, а также возникающих в процессе изготовления дефектов и волнистостей. Кроме того, оптические свойства композитного материала зависят от контрастности между его компонентами.

Цель работы заключается в исследовании характера влияния параметров составляющих микрорельефа поверхности, а также параметров цвета композитных материалов на их оптические свойства.

## Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента в рамках настоящей работы было изготовлено 5 образцов композитных материалов, в которых связующим компонентом выступал силикон (объемное содержание – 80%), а наполнителями – соответственно порошкообразные таурит, шунгит, диоксид титана (неорганические наполнители), лавровый лист и хна (органические наполнители). Измерения параметров составляющих микрорельефа поверхности изготовленных материалов (высоты шероховатости и глубины дефекта) были произведены с помощью микроскопа металлографического агрегатного МЕТАМ-Р1 и фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2-16, состоящего из окулярного микрометра и электронно-вычислительного устройства. Процесс измерений включал в себя три этапа. На первом этапе осуществлялась настройка микроскопа в соответствии с его техническим описанием. На втором этапе проводились измерения параметров, необходимых для расчета увеличения всех объективов микроскопа ( $V$ )

$$V = \frac{W \cdot Q}{Z \cdot C},$$

где  $W$  – цена импульса, равная 4 мкм,  $Q$  – число импульсов, соответствующих длине измеряемого отрезка в плоскости изображения объект-микрометра,  $Z$  – число делений объект-микрометра,  $C$  – цена деления шкалы объект-микрометра.

На третьем этапе на предметном столике микроскопа размещался образец, после чего осуществлялась фокусировка микроскопа на резкое изображение измеряемой неоднородности с помощью одного из объективов микроскопа. Далее микрометр разворачивался таким образом, чтобы его подвижный штрих был перпендикулярен по отношению к измеряемому отрезку и совпадал с краем неоднородности. Расчет значения размера неоднородности производится автоматически на основании формулы

$$L_i = \frac{W \cdot Q_i}{V},$$

где  $Q_i$  – число импульсов, соответствующих размеру измеряемой неоднородности.

Измеренные значения параметров составляющих микрорельефа поверхности изготовленных композитных материалов представлены в таблице. После проведения расчета значений размера неоднородностей поверхности образца определялись величины среднеквадратического отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности измерений ( $\sigma$ ), исходя из следующих формул:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{\text{ср}} - L_i)^2}{n-1}}, \quad \sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $L_{\text{ср}}$  – среднее арифметическое результатов нескольких измерений,  $L_i$  – результат одного измерения,  $n$  – количество измерений.

Установлено, что значение  $\sigma$  для всех проведенных измерений составляет 11,2 мкм,  $\sigma_0$  – 2,5 мкм.

**Средние величины шероховатостей и дефектов поверхности композитных материалов**

Наполнитель	Параметры неоднородностей	
	Высота шероховатости, мкм	Глубина дефекта, мкм
Таурит	13,19	17,53
Шунгит	15,54	25,80
Диоксид титана	15,81	27,28
Лавровый лист	88,63	39,00
Хна	29,26	23,29

## Результаты и их обсуждение

При взаимодействии света с материалами имеют место его отражение и рассеяние. В процессе отражения света от прозрачной среды суммарная энергия электромагнитного поля остается неизменной, меняется лишь его конфигурация (направление распространения). Однако в этом случае происходят промежуточные процессы преобразования энергии. Энергия падающей волны частично превращается в энергию вынужденных колебаний частиц среды. Эти колебания порождают вторичные волны (происходит когерентное несмещенное рэлеевское рассеяние в среде). Сложение падающей волны со вторичными волнами создает отраженные и преломленные волны. Эти процессы имеют место в тонком слое вблизи границы раздела сред. Более сложный процесс наблюдается в непрозрачных средах, в том числе и в композитных материалах. В таких средах время установления поля может быть значительным из-за большой глубины пробега фотонов, формирующих отраженный свет за счет многократного рассеяния (некогерентный процесс).

Волны, рассеиваемые в одном и том же направлении частицами наполнителя композитного материала, облучаемыми одним и тем же световым пучком, связаны фазовыми соотношениями и могут интерферировать. То обстоятельство, что длина волны сохраняется при рассеянии неизменной, означает, что рассеянные волны усиливают друг друга в фазе или гасят одна другую в противофазе, или находятся в промежуточном фазовом соотношении. Предположение о том, что волны рассеиваются независимыми частицами, означает, что систематическое соотношение между этими фазами отсутствует. Незначительное перемещение одной частицы или небольшое изменение угла рассеяния может полностью изменить фазовые сдвиги. В результате оказывается, что для всех практических целей интенсивности света, рассеянного различными частицами, должны складываться без учета фазы.

Таким образом, рассеяние электромагнитного излучения оптического диапазона композитными материалами обуславливается его преломлением и дифракцией на частицах их порошкообразного наполнителя [2, 3]. Величина интенсивности рассеиваемого композитными материалами света зависит от их показателей преломления, показателей преломления их наполнителей, соотношения объемного содержания наполнителя и связующего вещества

$$I_p = \frac{24\pi^3 \cdot V_q \cdot v_q^2}{\lambda^4} \cdot \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1^2 + 2 \cdot n_2^2} \right),$$

где  $I_p$  – интенсивность рассеиваемого композитным материалом света,  $V_q$  – объем частиц наполнителя в композитном материале,  $v_q$  – концентрация частиц наполнителя в композитном материале,  $\lambda$  – длина падающей волны,  $n_1, n_2$  – показатели преломления наполнителя и композитного материала соответственно.

Кроме того, величина интенсивности рассеиваемого композитными материалами света зависит от текстуры и микрорельефа их поверхности (шероховатости, дефектов, волнистости). В свою очередь, от величины интенсивности рассеиваемого композитными материалами света зависят значения их КСЯ и степени поляризации.

Текстура материала характеризуется соотношением в нем частиц различных размеров. Если в связующее добавляется порошок с одинаковым размером частиц, то текстура синтезируемого композитного материала является однородной. Увеличение содержания в материале частиц малых размеров приводит к увеличению многократного внутреннего рассеяния света, а значит, к уменьшению КСЯ и степени поляризации материала. Добавление порошкообразных наполнителей в силикон приводит к увеличению шероховатости его поверхности, что, в свою очередь, обуславливает увеличение интенсивности рассеиваемого ею света. Кроме того, вследствие увеличения шероховатости поверхности, увеличивается доля ее площади, занимаемой тенями и, следовательно, уменьшаются значения интенсивности отраженного света, КСЯ и степени поляризации.

На практике для оценки шероховатости поверхности материала применяются критерии Рэлея и Шифрина.

Согласно критерию Рэлея, поверхность считается гладкой, если [4]

$$h \leq \frac{\lambda}{16 \cdot \cos \theta}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота шероховатости,  $\theta$  – угол падения света.

Критерий Шифрина характеризует степень шероховатости:

$$\eta = \frac{2 \cdot h \cdot \cos \theta}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент шероховатости.

На основании расчета, проведенного по формуле (1), были построены графические зависимости минимальной высоты шероховатости поверхности материала, при которой она не будет являться гладкой относительно падающей волны, от длины последней при углах падения света 25°, 45°, 65° и 85° (см. рис. 1). Исходя из данной графической зависимости можно заключить, что поверхности всех изготовленных в рамках настоящей работы композитов являются шероховатыми относительно длин волн 370...2370 нм.

В процессе изготовления композитных материалов на их поверхности могут возникать дефекты (царапины). С увеличением их количества и глубины увеличивается интенсивность рассеиваемого поверхностью материала света, что приводит, так же, как и в случае с шероховатостями, к уменьшению интенсивности отраженного света, КСЯ и степени поляризации.

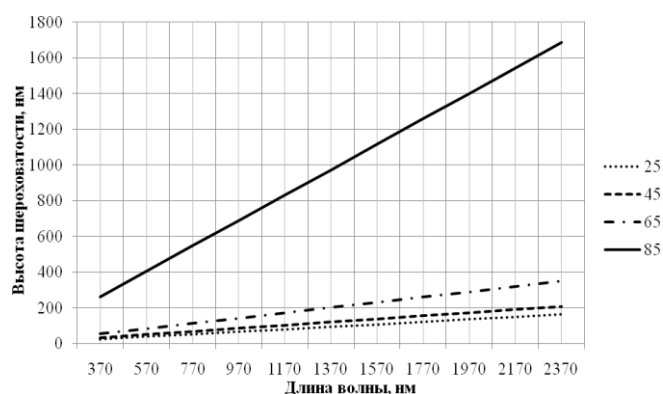


Рис. 1. Зависимость минимальной высоты шероховатостей поверхности, при которой она не является гладкой, от длины волны при различных углах падения света

На основании результатов расчета, проведенного по формуле (2) с использованием результатов измерений составляющих микрорельефа поверхности изготовленных композитных материалов, были построены графические зависимости коэффициентов шероховатости поверхности последних от длины падающей волны при углах падения света 25°, 45°, 65° и 85° (см. рис. 2).

Коэффициенты шероховатости композитов, изготовленных на основе шунгита и диоксида титана практически равны. Графические зависимости КСЯ данных материалов от длины волны при различных углах наблюдения представлены на рис. 3, 4 (кривые 1 соответствуют углу падения света 5°, 2 – 25°, 3 – 45°, 4 – 65°). Значения КСЯ и степени поляризации композитов, выполненных на основе порошкообразного шунгита, ниже аналогичных значений для композита, выполненного на основе диоксида титана.

На величины КСЯ и степени поляризации композитных материалов, наряду с микрорельефом их поверхности, влияет и степень контрастности между их компонентами, с увеличением которой КСЯ и степень поляризации снижаются. Мелкодисперсный шунгит – порошок черного цвета, диоксид титана – порошок белого цвета. Поэтому степень контрастности компонентов композита, выполненного на основе шунгита, выше степени контрастности композита, выполненного на основе диоксида титана.

Степени контрастности композитов, выполненных на основе хны и лаврового листа, сопоставимы друг с другом. Значения КСЯ и степени поляризации композита, выполненного на основе хны, превышают значения аналогичных параметров композита, выполненного на ос-

нове лаврового листа, в связи с тем, что коэффициент шероховатости поверхности последнего выше.

Значения КСЯ и степени поляризации композитных материалов зависят от угла наблюдения. Данная зависимость характеризуется индикатрисой рассеяния. Композитным материалам, как правило, свойственна неортогортная поверхность (горизонтально-неоднородная ламбертова поверхность), индикатрису которой можно аппроксимировать комбинацией полусферы и эллипсоидов. При увеличении угла наблюдения в пределах диапазона  $0^\circ \dots 45^\circ$  значение КСЯ и степени поляризации неортогортных поверхностей возрастает, в пределах диапазона  $45^\circ \dots 90^\circ$  – снижается. Для индикатрис данного типа характерно наличие нескольких точек экстремума. В связи с этим графические зависимости КСЯ и степени поляризации, соответствующие углу наблюдения  $65^\circ$ , в координатной плоскости расположены ниже графических зависимостей, соответствующих углу наблюдения  $45^\circ$ .

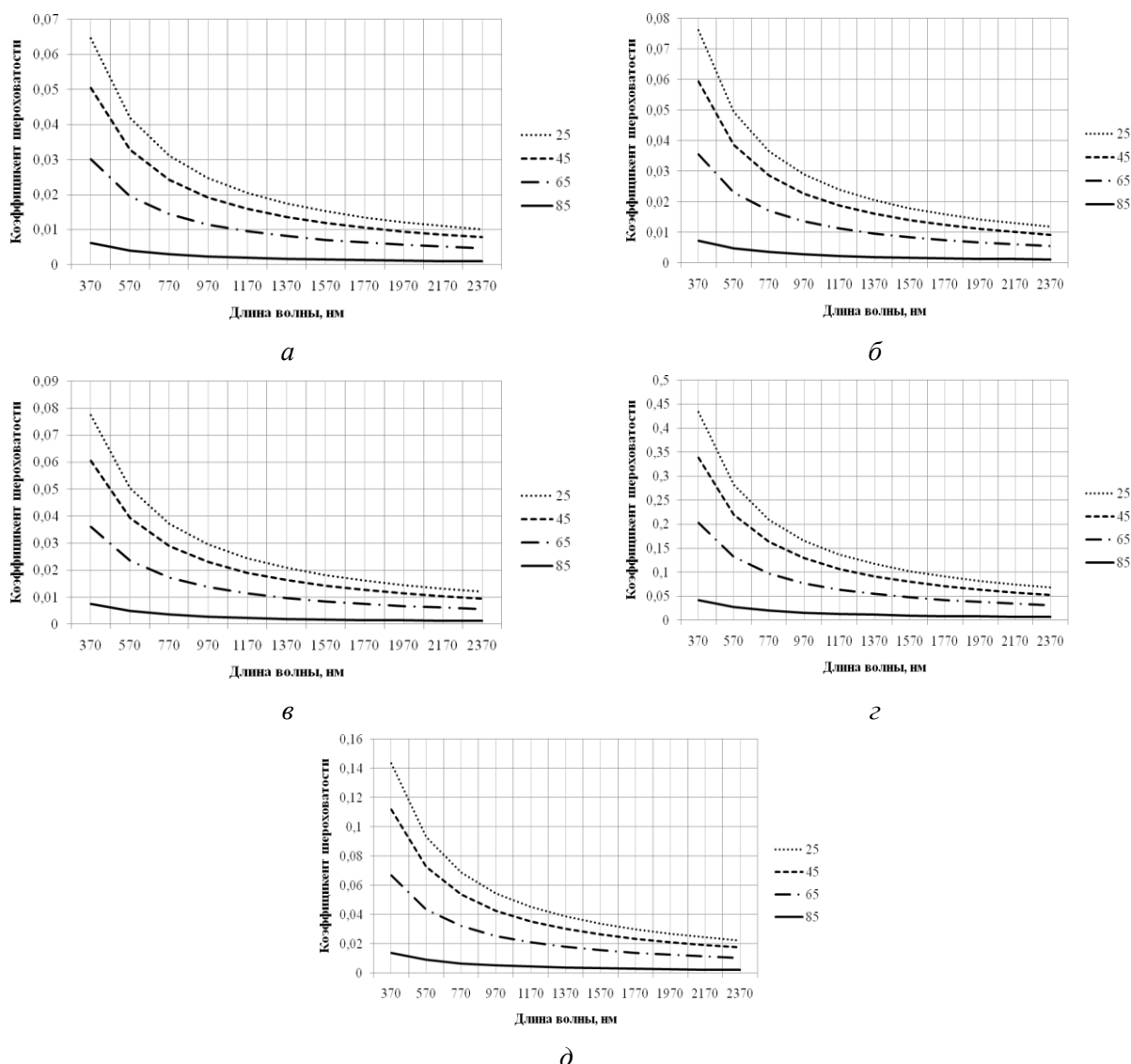


Рис. 2. Зависимость коэффициента шероховатости поверхности от длины волны при различных углах падения света для композитного материала, изготовленного на основе порошкообразных таурита (а), шунгита (б), диоксида титана (в), лаврового листа (г), хны (д)

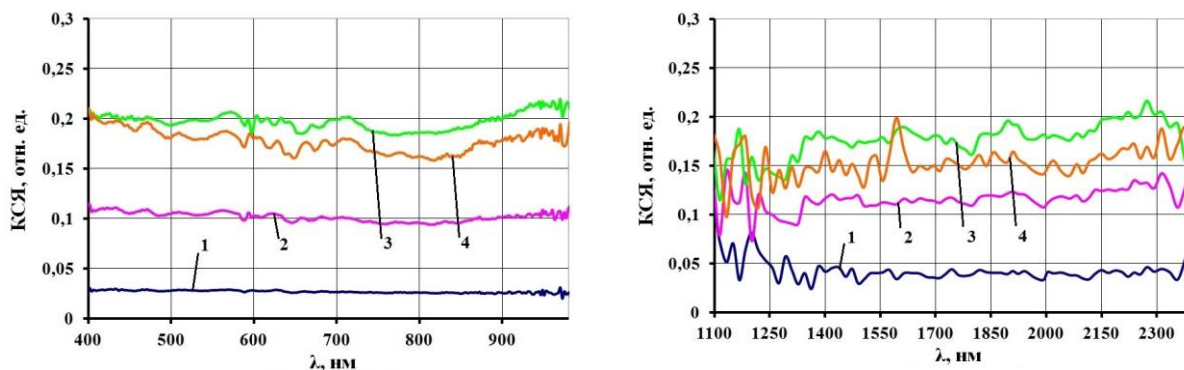


Рис. 3. Зависимость КСЯ от длины волны для композитного материала, изготовленного на основе порошкообразного шунгита

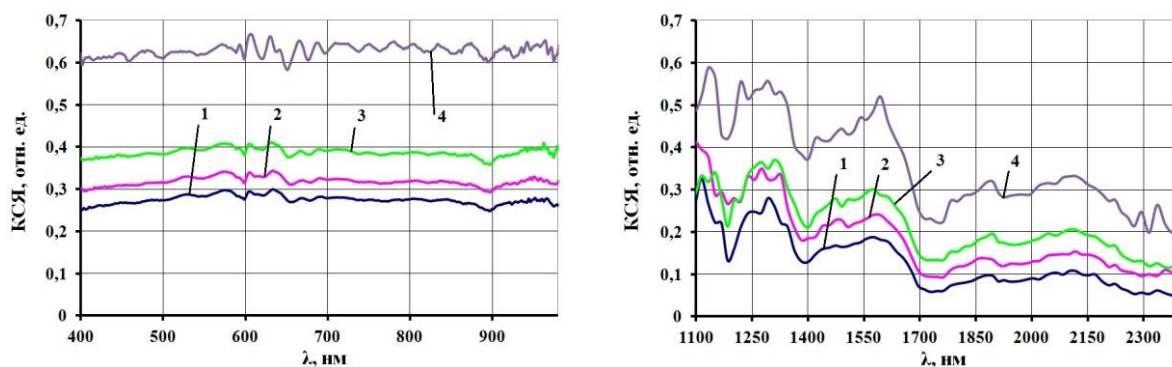


Рис. 4. Зависимость КСЯ от длины волны для композитного материала, изготовленного на основе порошкообразного диоксида титана

### Заключение

Применение того или иного типа наполнителя в композитном материале позволяет влиять не только на его механические и массогабаритные характеристики, но и на оптические свойства. В частности, при увеличении размера фракций наполнителя увеличивается высота шероховатостей и глубина дефектов композита, что приводит к увеличению интенсивности рассеиваемого им света, а значит, снижению значений КСЯ и степени поляризации.

## INFLUENCE OF THE COMPOSITE MATERIALS SURFACE MICRORELIEF ON THEIR OPTICAL PROPERTIES

O.V. VOIPRAV, D.V. STOLER, T.V. BORBOTKO, A.A. KAZEKA

### Abstract

The analysis of the components parameters and surface microrelief parameters of the composite materials influence for the spectral brightness and polarization of the latter is presented.

### Список литературы

1. Карпинос Д.М. Композиционные материалы. Справочник. Киев, 1985.
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., 1961.
3. Кизель В.А. Отражение света. М., 1973
4. Шухостанов В.К., Цыбанов А.Г., Ведешин Л.А. // Сб. докладов Всероссийской конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2004. С. 102–116.