

# Исследование фазовых изменений в поверхностном слое пористых материалов при помощи лазерного излучения\*

Т.В.Войтатович

*Рассмотрены некоторые аспекты использования интерференционных картин, возникающих при отражении лазерного излучения от поверхности пористого тела (лазерных спеклов), для исследования конденсации влаги в приповерхностном слое. Полученные результаты представляют интерес для лабораторного контроля увлажнения гипсовых образцов.*

**Ключевые слова:** лазерные спеклы, пористые тела, влажность.

## 1. Введение

Неразрушающие исследования различных свойств вещества являются очень важной областью применения лазерного излучения. В этих исследованиях лазерное излучение выполняет роль точного датчика, не воздействующего на состояние исследуемого материала. В настоящее время взаимодействие лазерного излучения с пористыми телами (особенно диэлектриками) изучено недостаточно. Неразрушающие лазерные методы могут быть использованы, например, в материаловедении или для защиты памятников, что послужило основанием для настоящих исследований.

«С точки зрения» лазерного света поверхность пористого тела является очень грубой. Когда почти монохроматичное излучение отражается от такой поверхности, результирующая оптическая волна в любой достаточно удаленной от поверхности точке складывается из большого числа когерентных волн, каждая из которых возникает в результате отражения от различных участков поверхности. Оптические пути между этими волнами могут различаться на несколько длин волн.

У волн, рассеянных такой грубой поверхностью, случайны не только фазы, но и вещественные амплитуды. Интерференция несфазированных, но когерентных вторичных волн приводит к «гранулированной» картине интенсивности, называемой спекловой картиной (спеклами). Эта картина не связана очевидным образом с макроскопической структурой освещаемого объекта, а имеет скорее беспорядочный, хаотический характер, описываемый теорией вероятностей и статистическими методами [1]. Когда вблизи или прямо на поверхности материалов имеются микроскопические капли воды, некоторые волны, отраженные от этих капель, приобретают дополнительную разность оптических путей, давая соответствующий вклад в интерференционную картину.

\*Перевел с английского В.Е.Левашов.

Как показывают предварительные исследования [2–4], имеется зависимость между параметрами лазерного света, отраженного от пористого тела, и содержанием в нем влаги. Однако из-за сложности геометрической микроструктуры поверхности пористого тела (которая тоже может быть исследована с помощью лазерного излучения [5]) и сложности физических процессов, происходящих на ней, лишь отдельные явления могут быть изучены. В настоящее время нет теории, описывающей связь между параметрами спеклов лазерного излучения, отраженного от поверхности пористого тела, структурой поверхности и состоянием влажности.

Цель данной работы – исследование влияния содержания влаги в приповерхностном слое пористого тела на параметры лазерного света, отраженного от него, выбор оптимальной геометрии измерений и анализируемых параметров. Объектом исследований были пористые образцы гипсовой суспензии, измерения проводились при разных геометриях экспериментальной установки.

## 2. Эксперимент

В первых исследованиях отражения излучения от влажных пористых тел [2], в которых была обнаружена зависимость между содержанием влаги и параметрами отраженного света, интенсивность отраженного пучка измерялась фотодетектором в узком телесном угле в направлении зеркального отражения. В настоящей работе была применена более сложная установка. Картины лазерных спеклов регистрировались двумя ПЗС-камерами (первая была расположена в направлении зеркального отражения, а вторая – в направлении, перпендикулярном к поверхности образца).

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Установка состоит из красного гелий-неонового лазера (Melles-Griot, 17 мВт), излучение которого направлялось на поверхность образца под углом 30–45°. Образец располагался на столике Пельтье, который позволял нагревать его до температуры 35 °С и охлаждать до –5 °С. Температура измерялась в четырех точках (1–4) с помощью точных термпар, а влажность – в двух точках (3 и 4) полимерными датчиками влажности. Микрокомпьютер был снабжен устройством считывания ви-

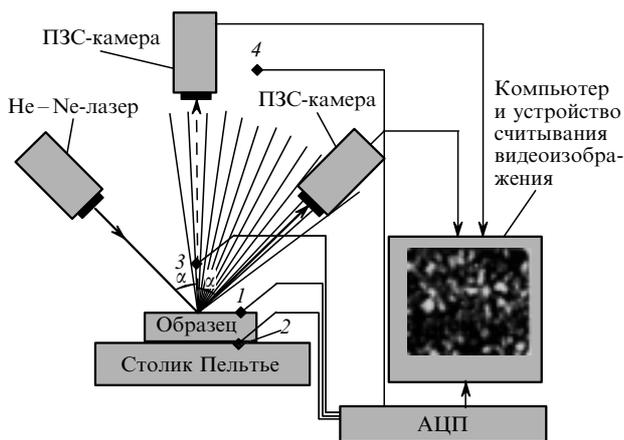
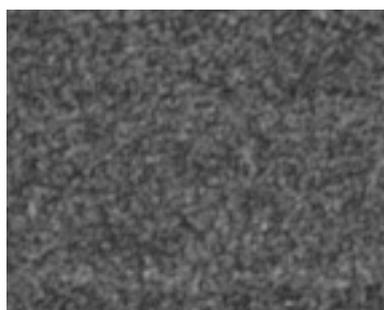


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

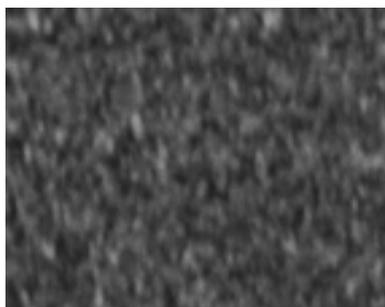
деоизображения и АЦП. Между лазером и образцом, а также между поверхностью и камерами были установлены линзы и диафрагмы (на рис.1 не показаны).

На рис.2 представлены спеклограммы, полученные для сухого гипсового образца. Можно видеть, что размеры спеклов в направлении зеркального отражения меньше, чем в перпендикулярном направлении, но в первом случае изображение является более резким (более контрастным).

На рис.3 показана зависимость интенсивности отраженного света от положения (определяемого номером точки) вдоль произвольно выбранной горизонтальной линии на спеклограмме. Отсюда можно получить некоторые параметры спеклов, например «среднюю длину линии» или площадь под кривой (заштрихована на рис.3), среднюю интенсивность отраженного света (штриховая



а



б

Рис.2. Спеклограммы лазерного пучка, отраженного от поверхности сухого гипсового образца в зеркальном направлении (а) и в направлении, перпендикулярном к поверхности (б).

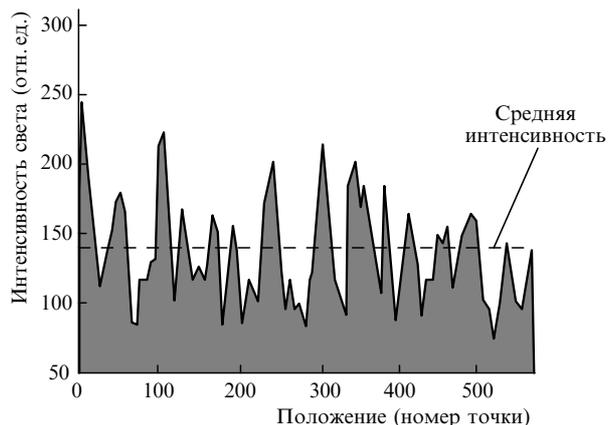


Рис.3. Зависимость интенсивности отраженного света от положения на произвольно выбранной горизонтальной линии.

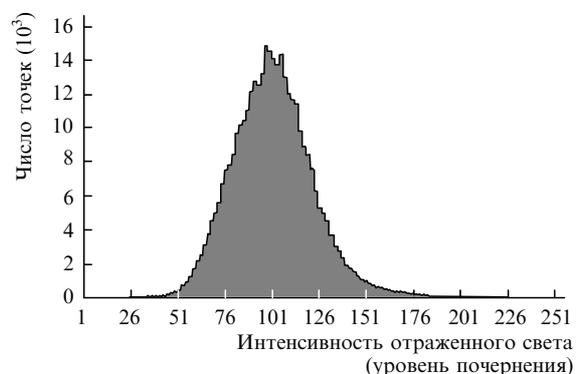


Рис.4. Гистограмма оцифрованной интенсивности отраженного света (по уровням почернения).

линия), число и средний диаметр спеклов или контраст изображения. На примере гистограммы, показанной на рис.4, мы можем вычислить среднюю интенсивность отраженного света и статистические параметры, такие как асимметричность и эксцесс распределения интенсивности света в спеклограмме.

### 3. Результаты эксперимента

Предварительный эксперимент [6] был выполнен на установке, описанной выше. Спеклограммы регистрировались во время насыщения макетных образцов водой при постоянной (для обоих образцов и комнаты) температуре 22 °С. В работе [6] было получено, что для зеркального направления площадь под кривой (соответствующая средней интенсивности света) квазилинейно уменьшается при увеличении содержания воды в образце. Таким образом, контраст и эксцесс спеклограммы увеличиваются при увеличении содержания воды. Напротив, для перпендикулярного направления площадь под кривой, «длина линии» и средняя интенсивность уменьшаются при увеличении содержания влаги, тогда как контраст и эксцесс спеклограммы увеличиваются. Другие характеристики спеклов меняются незначительно.

Дальнейшие исследования были выполнены в условиях, близких к естественной погоде, при медленном охлаждении образцов (0.5–2.0 °С/ч) от комнатной температуры до примерно –1 °С на столике Пельтье. Примеры полученных результатов показаны на рис.5, 6.

Очень интересной является зависимость асимметрич-

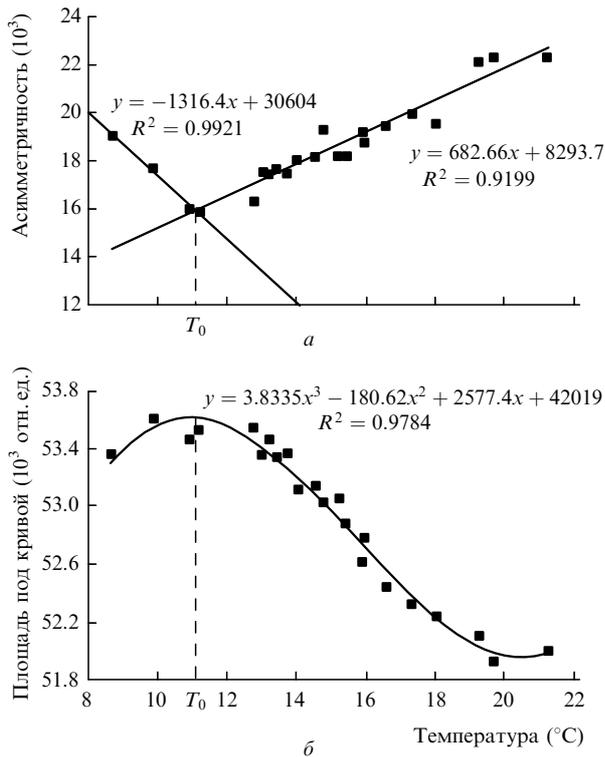


Рис.5. Зависимости асимметрии спеклограмм (а) и площади под кривой на рис.3 (б) от температуры поверхности гипсовых образцов с пористостью примерно 60 % для спеклограмм, полученных в направлении, перпендикулярном к поверхности ( $R$  – коэффициент корреляции).

ности от температуры для спеклограмм, полученных в перпендикулярном направлении (рис.5,а), т. к. они имеют минимум при температуре  $T_0$ , при которой, вероятно, начинается конденсация водяных паров на поверхности (точка росы). Эта температура  $T_0$  отвечает точке максимума на кривых площади как для перпендикулярного (рис.5,б), так и для зеркального (рис.6,а) направления. Эти кривые могут быть аппроксимированы полиномом третьего порядка. На рис.6,б показана зависимость эксцесса от температуры, полученная для зеркального направления, с максимумом около точки  $T_0$  (см. рис.5 и 6,а). Полученная таким путем температура  $T_0 \approx 11^\circ\text{C}$ , что ниже теоретически рассчитанной для гладкой поверхности, составляющей  $14.7^\circ\text{C}$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, обнаружена четкая зависимость между параметрами лазерных спеклов и содержанием влаги в поверхностном слое пористых тел. Эта зависимость очень важна как для понимания взаимодействия лазерного излучения и пористого тела, так и для будущих

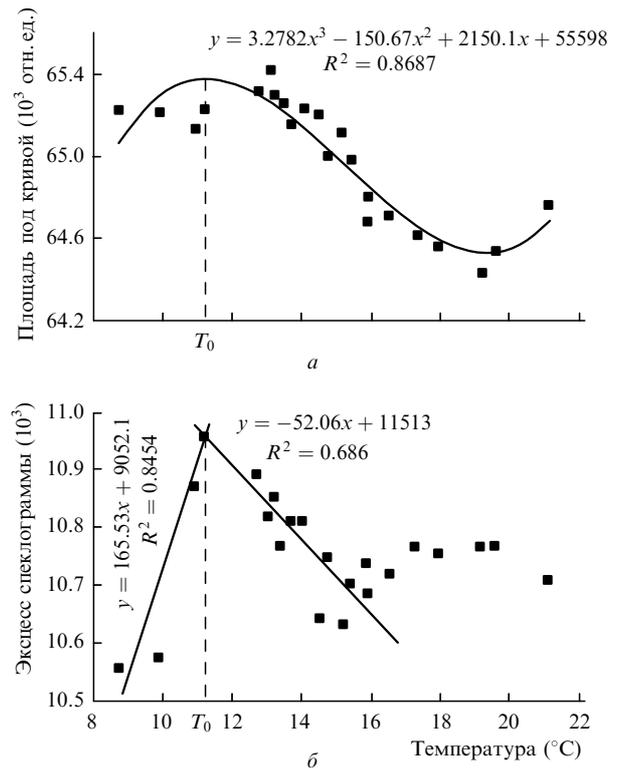


Рис.6. Зависимости площади под кривой на рис.3 (а) и эксцесса спеклограмм (б) от температуры поверхности гипсовых образцов с пористостью примерно 60 % для спеклограмм, полученных в зеркальном направлении.

применений (например, бесконтактный контроль состояния влажности поверхности стен античных зданий, музеев и т. д.). Другие проблемы применения описанного метода – влияние условий окружающей среды (например, движение воздуха над поверхностью образца и в лазерном пучке), – а также чувствительность метода могут представить материал для будущих исследований.

Работа поддержана Комитетом научных исследований Польши, контракт 7-T07E-00214.

1. Dainty J.C. (ed.) *Laser speckle and related phenomena* (Berlin, Springer, 1975).
2. Дробник А., Рожняковский К., Войтатович Т.В. *Квантовая электроника*, **22**, 741 (1995).
3. Wojtatowicz T.W. *Ph.D.(Phys.) Thesis* (Lodz, University of Lodz, 1996).
4. Wojtatowicz T.W. *Proc.VI Sci.-Technol.Conf.«Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce»* (Lodz, 1997, p. 395).
5. Rozniakowski K. In: *Fizyka materialow i konstrukcji budowlanych* (Lodz, KFBiMB PL, 1993, t. I, p. 138).
6. Rozniakowski K., Klemm P., Wojtatowicz T.W. *Proc. VII Sci.-Technol.Conf.«Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce»* (Lodz, 1999, p. 242).