

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ СТЕКЛЯННЫХ КОМПОЗИТОВ С ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПОКРЫТИЯМИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ РАСТВОРОВ

atkarsk06@mail.ru

Аткарская А.Б., д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Нарцев В.М., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Чартий П.В., канд. физ.-мат. наук, доц.,
Шеманин В.Г., д-р физ.-мат. наук
*Новороссийский политехнический институт Кубанского
государственного технологического университета*

Аннотация. Показана взаимосвязь микротвердости и оптических характеристик пленок и композитов с объемной долей дисперсной фазы пленкообразующих золь, использованных для нанесения наноразмерных двухкомпонентных покрытий системы $TiO_2-Me_xO_y$, размером коллоидных частиц и плотностью их упаковки в слой наноразмерного покрытия.

Ключевые слова: наноразмерное покрытие, показатель преломления и светопропускание композита с наноразмерным покрытием, толщина и показатель преломления покрытия, скорость нанесения, свойства золя.

Введение.

Нанокompозиты, представляющие собой стеклянную подложку с нанесенной на ее поверхность оксидной наноразмерной пленкой, находят широкое применение в оптическом приборостроении, промышленном и гражданском строительстве, активно используются для исследовательских целей [1 – 3].

Нанесение покрытий может производиться как физическими, так и химическими способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Химический способ перспективен тем, что не требует прецизионного оборудования [4], но вместе с тем, он имеет некоторые отрицательные свойства, главное из которых – использование в технологическом процессе коллоидных растворов-золь, весьма чувствительных к изменению химического состава прекурсоров и самого золя, к условиям хранения, нанесения и закрепления

пленкообразующих растворов на подложке [5, 6]. В работе [7] нами было показано, что оптические параметры наноразмерного покрытия определяются размерами коллоидных частиц в растворе.

Изучены композиционные материалы, в состав которых входила подложка из листового стекла со сформированной на поверхности наноразмерной пленкой. Пленка состояла из TiO_2 , модифицированного одним из оксидов ZnO , CdO , SnO , CuO , Fe_2O_3 , вводимых в количестве 2 или 10 мас. % В рамках работы использован химический метод нанесения покрытий (золь-гель технология), сводящийся к извлечению с постоянной скоростью подложки из пленкообразующего раствора (золя).

Целью работы является исследования влияния размера d , объемной доли ϕ и плотности упаковки γ дисперсной фазы золя на толщину h , показатель преломления n покрытий и пороговые плотности лазерного абляционного разрушения этих композитов.

Исходные материалы для приготовления зольей (табл. 1): источник TiO_2 алкоксид титана - тетраэтоксититан $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Порошкообразные оксиды цинка, кадмия, меди, олова и железа предварительно растворялись в концентрированной соляной или 70% азотной кислоте. Суммарная массовая концентрация пленкообразующих оксидов в золях составляла 5%. Длительность хранения зольей перед нанесением (длительность созревания) изменялась от 1 до 20 сут. Растворителем служил абсолютный изопропиловый спирт по ГОСТ 9805-84, гидролиз – кислый, катализатор гидролиза алкоксида титана – соляная кислота ЧДА по ГОСТ 3118–77 или азотная кислота ос. ч. по ГОСТ 11125-84 одноименная с кислотой, использованной для растворения модифицирующих оксидов.

Таблица 1 – Материалы, использованные для приготовления пленкообразующих зольей

Оксид	Прекурсор
TiO_2	Тетраэтоксититан $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, «Ч», ТУ 6-09-11-2170-97
CdO	Кадмия оксид «ЧДА», ГОСТ 11120-75
CuO	Меди (II) оксид «ЧДА», ГОСТ 16539-79
Fe_2O_3	Железо (III) оксид «ЧДА», ГОСТ 4173-77
SnO	Олова (II) оксид «Ч», ТУ 6-09-1503-76
ZnO	Цинка окись «ЧДА», ГОСТ 10262-73

Кинематическую вязкость зольей измеряли вискозиметром ВПЖ-1, плотность зольей измеряли денсиметром, светопропускание в слое

толщиной 20 мм на длинах волн 315,364, 400, 540 и 670 нм измеряли с помощью прибора КФК-3.

По результатам измерений рассчитывали объемную долю дисперсной фазы золя φ [8]:

$$\eta = \eta_0(1 - 2,5\varphi), \quad (1)$$

где η , η_0 – вязкости соответственно золя и растворителя.

В предположении, что форма частиц сферическая или близка к таковой, размер частиц дисперсной фазы d рассчитывали по уравнению Геллера [9], исходя из измеренного пропускания золями оптического излучения. Ввиду ограниченности метода, позволяющего производить расчеты только для «белых» зелей, для окрашенных медьсодержащих растворов выбирались длины волн, на которых поглощение комплексов меди минимально.

Плотность упаковки частиц дисперсной фазы γ в слой наноразмерного покрытия рассчитывали без учета взаимодействия между частицами по следующему выражению [10]:

$$\gamma = 0,75 \cdot d \cdot \varphi. \quad (2)$$

Следует отметить, что размер частицы дисперсной фазы в золе тем больше, чем больше размер частицы в высушенном и термообработанном покрытии, однако можно предположить, что результаты расчетов γ по размеру дисперсной фазы золя будут пропорциональны плотности упаковки, существующей в покрытии.

Изготовление и контроль композитов. Наносили двухсторонние покрытия окунанием в пленкообразующие растворы образцов флоат-стекла размером 50×50 и толщиной 4 мм марки М1 по ГОСТ 101–90, вырезанных из одного листа форматом 3×6 м.

Скорость извлечения подложки из пленкообразующих растворов (скорость нанесения) составляла 3,8; 5,8 или 17,3 мм/с. После нанесения золя образцы выдерживали при комнатной температуре в течение 1,5 ч для частичного испарения растворителя, более полного протекания процессов гидролиза и поликонденсации материала покрытия, а затем подвергали термообработке в СВЧ-печи в течение 30 мин

После охлаждения образца толщину h и показатель преломления n пленки измеряли методом спектральной эллипсометрии (прибор Uvisel 2).

Пропускание света T (в процентах) образцов нанокompозитов в видимой области спектра 400 – 800 нм регистрировалось микроспектрометром типа FSD-8 и обрабатывалось в персональном компьютере (ПК). По результатам измерений рассчитывали среднее значение пропускания T_{mid} композита в видимой области спектра.

Для экспериментального исследования лазерной абляции покрытий, являющихся составной частью композитов, были выполнены измерения значений пороговой плотности энергии лазерного излучения, при которых начинается пробой покрытия на поверхности образца. Лабораторная лазерная абляционная станция, использованная для измерений, была собрана на базе экспериментальной установки из [11, 12, 16] и ее структурная схема приведены на рис. 1.

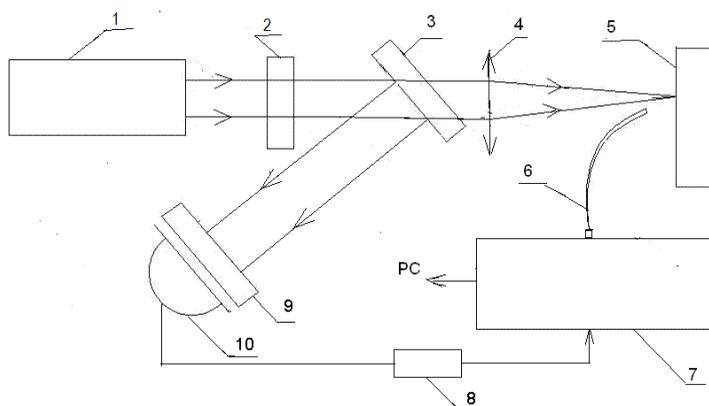


Рисунок 1 – Лабораторная лазерная абляционная станция: 1 – лазер, 2 – нейтральный светофильтр НС для изменения энергии излучения, 3 – стеклянная пластина, 4 – фокусирующий объектив, 5 – образец, 6 – световод, 7 – микроспектрометр FSD-8, 8 – управляемая ПК линия задержки, 9 – светофильтр ИКС-1 и 10 – фотодиод

Источник излучения – лазер 1 на алюмоиттриевом гранате с неодимом – генерировал импульсы на длине волны 1064 нм длительностью 20 нс с энергией до 0.15 Дж и 300 мкс с энергией 1.2 Дж в двух режимах с модуляцией добротности и разными пассивными затворами. Излучение лазера 1 фокусировалось специальным объективом 4 на поверхность нанокompозита. Изменение плотности

энергии лазерного импульса в диапазоне от 0.1 до 100 Дж/см² достигалось как выбором фокусного расстояния объектива 4, так и ослаблением излучения калиброванными нейтральными светофильтрами 2 типа НС. Явление пробоя фиксировалось по наличию собственного свечения лазерной плазмы, которое регистрировалось микроспектрометром типа FSD-8 (производство ИОФ РАН) 7 с волоконным вводом 6. Для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации всей лабораторной установки использовался фотодиод 10 со светофильтром 9 типа ИКС-1. Контролируемая ПК линия задержки 8 необходима для запуска спектрометра 7 относительно переднего фронта лазерного импульса. Режимы работы спектрометра 7, управление линией задержки 8 и обработка результатов измерений осуществлялась на ПК.

На первом этапе были выполнены калибровочные эксперименты на мишени из фторопласта ФП-4 [11, 12] и пороговая плотность энергии при вероятности пробоя 0.5 равна $F_b = 25$ Дж/см² в соответствии с результатами [12]. Чтобы генерировать кривую вероятности пробоя необходимо сделать не менее 20 измерений при заданной энергии импульса лазерного излучения и измерить число событий пробоя на поверхности мишени по отношению к общему числу измерений. Устанавливая новое, меньшее, значение плотности энергии и повторяя этот процесс измерений, последовательно проходилась весь диапазон значений вероятности пробоя от 1 до 0. Если кривая вероятности лазерного пробоя от плотности энергии на графике не получается гладкой, то это означает, что погрешность измерения пороговой плотности энергии недостаточна и требуется увеличения числа измерений. Правильная интерпретация этой кривой вероятности важна для точного определения величин пороговой плотности энергии лазерной абляции нанокompозитов при вероятности 0.5 [12]. Эти калибровочные эксперименты позволили получить оптимальную геометрию облучения образца, которая использовалась во всех дальнейших экспериментах.

На втором этапе были получены кривые вероятности пробоя для всех образцов и для одного из образцов эта кривая приведена на рис. 2 в качестве примера. Такие кривые вероятности пробоя для экспериментальных точек на рис. 2 интерполировались полиномом на ПК. На графике рис. 2 каждая ордината определяется как отношение числа импульсов с пробоем и наличием свечения плазмы к общему числу импульсов для данного образца из-за стохастического характера лазерной абляции. По полученной зависимости на уровне с

вероятностью $P = 0.5$ [12] получалось значение пороговой плотности энергии F_b которое равно $F_{bn} = 61.2$ Дж/см² для лазерного импульса 300 нс и для 20 нс - $F_{bn} = 32.8$ Дж/см². Относительная погрешность измерений составляла порядка 12%. Каждый образец измерялся от 20 до 100 раз при данном значении энергии, после чего фокус излучения переносился в новую точку образца. Для каждого образца рассматривалась зависимость вероятности пробоя от плотности энергии и строился такой же график, как на рис. 2. По этой зависимости по уровню с вероятностью $P = 0.5$ получалось значение пороговой плотности энергии F_b .

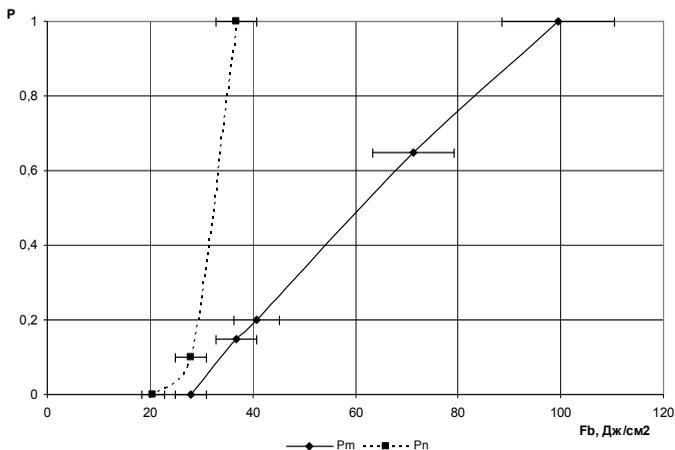


Рисунок 2 – График зависимости вероятности возникновения пробоя P образца от плотности энергии излучения F_b . Для микросекундных импульсов экспериментальные точки отмечены ромбом (сплошная кривая), для наносекундных – квадратом (штриховая)

Обсуждение результатов.

Рис. 3 демонстрирует зависимость толщины покрытий от основных характеристик золь. На каждом графике приведено несколько линий тренда, каждая из которых относится к образцам, полученным при фиксированной скорости нанесения. Такая разбивка необходима, поскольку скорость течения золя относительно подложки оказывает значительное влияние на свойства покрытий и композитов [5].

Около каждой линии тренда приведено линейное уравнение, связывающее исследуемые величины, и коэффициент аппроксимации, характеризующий линейную зависимость.

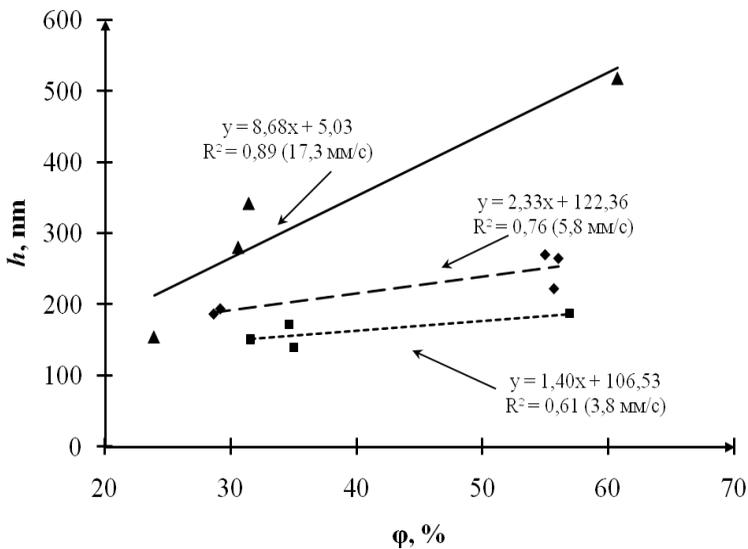
Очевидно (рис. 3,а), толщина покрытий повышается по мере увеличения объемной доли дисперсной фазы в пленкообразующем золе. Зависимость следует признать достаточно надежной, поскольку коэффициент аппроксимации линейных уравнений находится в пределах 0,61–0,89.

Обнаружено (рис. 3,б), что увеличение диаметра частиц дисперсной фазы приводит к однозначному росту толщины покрытий при скоростях нанесения 3,8 и 17,3 мм/с. Соответствующие линии тренда описываются коэффициентами аппроксимации, равными соответственно 0,61 и 0,98. Толщина покрытий при скорости нанесения 5,8 мм/с практически не зависит от размера частиц дисперсной фазы пленкообразующего раствора. Это может быть связано с особенностями распределения частиц в потоке золя, растекающегося по стеклянной подложке при извлечении подложки из золя со скоростью 5,8 мм/с.

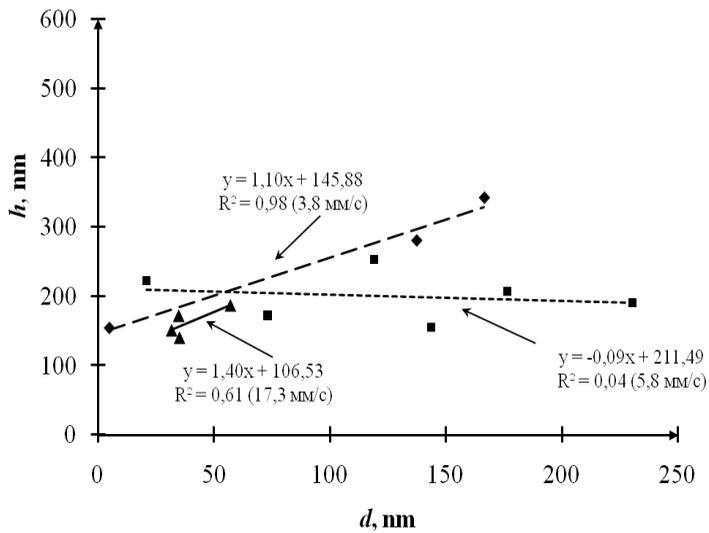
Плотность упаковки частиц дисперсной фазы условной псевдосферической формы в слой покрытия (рис. 3,в) оказывают положительное влияние на увеличение толщины покрытия. Коэффициенты аппроксимации линейных линий тренда, связывающих значения величин h и γ последовательно увеличиваются от 0,38 до 0,51 и 0,94 по мере увеличения скорости нанесения от 3,8 до 5,9 и 17,3 мм/с.

Таким образом, увеличение объемной доли дисперсной фазы золя, диаметра частиц и плотности их упаковки в слой способствует росту толщины золь-гель покрытия.

a)



b)



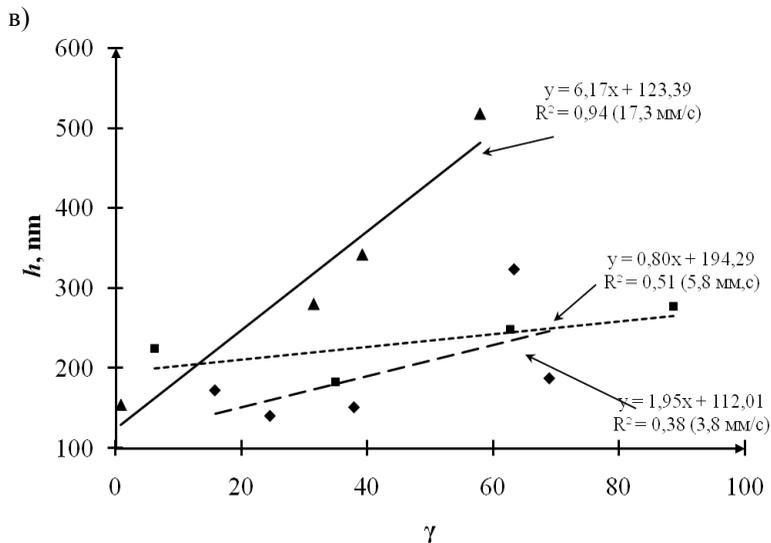


Рисунок 3 – Графики зависимости толщины наноразмерных покрытий от характеристик пленкообразующих золь-гелей использованных для нанесения покрытий

Показатель преломления твердого тела определяется прежде всего его химическим составом. Однако показатель преломления пористых тел, к которым относятся золь-гель покрытия, в известной степени определяется их пористостью и составом газов, заполняющих поры [13]:

$$n_{eff} = n_1 - \Pi(n_1 - n_3) - (n_2 - n_3) \cdot f(P/P_0), \quad (3)$$

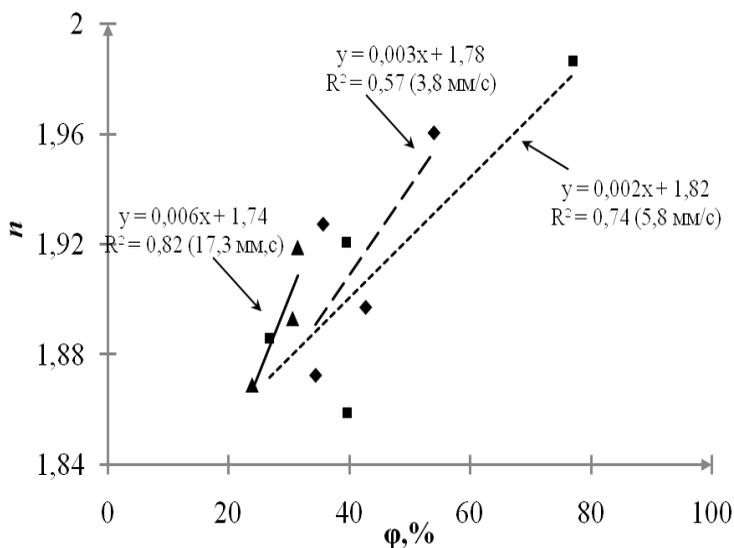
где n_{eff} , n_1 , n_2 , n_3 – соответственно показатели преломления самой пленки, скелета материала пленки, адсорбированной воды и воздуха; Π – пористость материала; функцию $f(P/P_0)$ примем равной единице.

Экспериментальные данные (рис. 4) указывают на существование прямо пропорциональной зависимости между показателем преломления нанопокртытия и значением величины объемной доли дисперсной фазы Φ (рис. 4,а). Это можно объяснить замедлением миграции низкопреломляющих оксидов натрия, кальция и кремния из подложки в нанопокртытие по мере роста его толщины [14]. Ожидаемый по расчету показатель преломления исследованных покрытий равняется 2,12-2,13 в зависимости от состава и концентрации модифицирующего оксида. Измеренные же значения показателей преломления не превышают 1,96

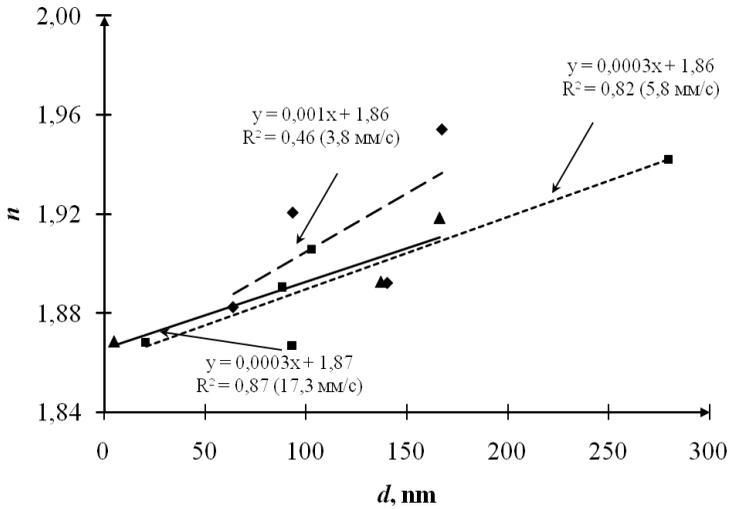
и изменяются в пределах 1,64-1,96 в зависимости от состава покрытия и катализатора гидролиза, использованного для приготовления пленкообразующих растворов. Это подтверждает тезис о миграции низкопреломляющих оксидов из стеклянной подложки.

Увеличение плотности упаковки частиц дисперсной фазы золя в слой (рис. 4,в) коррелирует с ростом показателя преломления наноразмерного покрытия. Предположительно это можно объяснить ослаблением диффузии из подложки в более плотно упакованное покрытие. Для экспериментального подтверждения этого предположения необходимо детальное изучение распределения компонентов в переходном слое наноразмерное покрытие- подложка.

а)



б)



в)

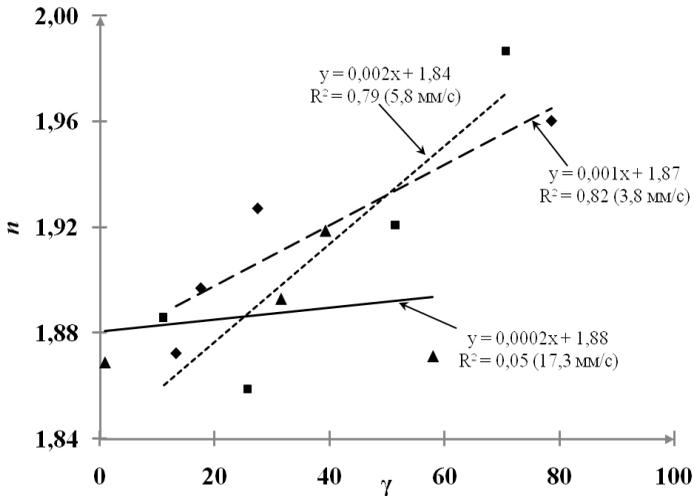


Рисунок 4 – Зависимость показателя преломления наноразмерных покрытий от характеристик пленкообразующих зольей, использованных для нанесения покрытий

Потери света в прозрачном материале, определяющие его пропускание, складываются, главным образом, из потерь на отражение от поверхности материала и рассеяние на неоднородностях его структуры. Основными такими неоднородностями являются поры, которые образуются вследствие неполного спекания частиц при низкой температуре термообработки покрытия (не превышает 500 °С); температура ограничена значением, при котором начинается деформация стеклянной подложки. Результаты измерения пропускания света образцами в зависимости от значений φ в золях приведены на рис. 5, а.

Эти графики показывают, что значения T_{mid} и объемная доля φ дисперсной фазы золя связаны обратно пропорциональной зависимостью с коэффициентами корреляции равными 0,65-0,69. Поскольку объемная доля дисперсной фазы прямо пропорциональна толщине покрытия (см. рис. 3,а), то увеличение пропускания образца по мере снижения толщины покрытия объясняется, очевидно, уменьшением рассеяния на неоднородностях микроструктуры более тонкого покрытия.

Что касается влияния плотности упаковки частиц в пленочном покрытии на величину его светопропускания (рис. 5,б), то при скорости нанесения 3,8 мм/с обнаружена лишь тенденция к обратно пропорциональной зависимости «плотность упаковки дисперсной фазы – светопропускание». Коэффициент аппроксимации повышается до 0,67 при увеличении скорости нанесения до 5,8 мм/с.

Обнаруженные тенденция и весьма надежная обратно пропорциональная зависимость между значениями величин $\gamma - T_{mid}$ объясняется ростом показателя преломления покрытия по мере увеличения плотности упаковки частиц в слой (рис. 4,в).

Коэффициент отражения R твердого тела пропорционален его показателю преломления в соответствии с выражением [15]:

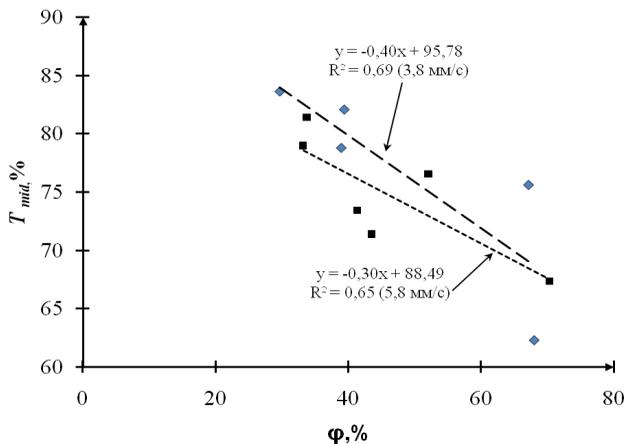
$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (4)$$

Поток света I_o , падающий на идеально однородную, без включений стеклянную плоско-параллельную пластину, частично отражается от ее поверхности (R), рассеивается на неоднородностях микроструктуры (μ), поглощается (A) матрицей и $d - + f$ - элементами, а оставшаяся часть (T) проходит через пластину.

$$I_o = R + \mu + A + T \quad (5)$$

Поэтому рост коэффициента отражения, пропорциональный показателю преломления покрытия, приводит к уменьшению светопропускания композита, что и демонстрирует рис. 5, б.

а)



б)

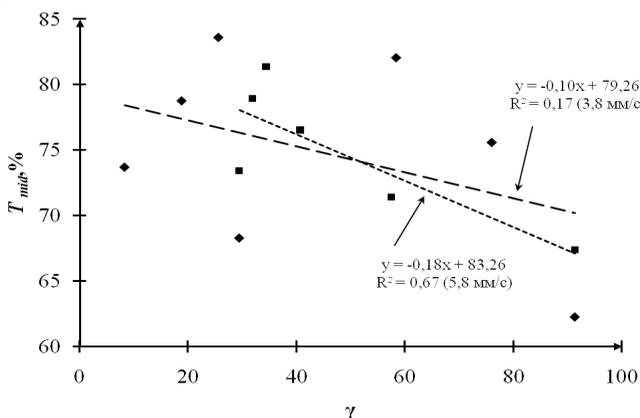


Рисунок 5 – График зависимости среднего измеренного светопропускания композитов T_{mid} от объемной доли ϕ дисперсной фазы зелей и плотности упаковки γ частиц в слой

Повышение плотности упаковки частиц дисперсной фазы в нанослой пропорционально увеличению плотности материала покрытия, и поэтому пороговая плотность энергии F_b , необходимая для лазерного абляционного разрушения под действия лазерного импульса наносекундной длительности (эффект термораскалывания [16]), будет увеличиваться симбатно плотности материала покрытия; именно это и следует из графика на рис. 4.

Взаимодействие материала с лазерным излучением в значительной степени зависит от длительности импульса.

Рабочая длина волны лазера, использованного в экспериментах по оценке оптической прочности композитов, равнялась 1064 нм. Закономерно предположить, что значение величины коэффициента отражения композита на этой длине волны будет оказывать влияние на пороговую энергию, необходимую для разрушения материала покрытия. Пороговая плотность энергии F_{bn} , необходимая для лазерного абляционного разрушения под действия лазерного импульса наносекундной длительности (эффект термораскалывания [16]), должна увеличиваться пропорционально увеличению R_{1064} материала покрытия; именно это и следует из графика на рис. 6,а.

Пороговая плотность энергии F_{bm} , необходимая для лазерного абляционного разрушения под действия лазерного импульса микросекундной длительности, обратно-пропорциональна R_{1064} материала покрытия (рис. 6,б).

Вместе с тем длительный импульс способствует плавлению материала покрытия, поэтому на значение пороговой плотности энергии должно оказывать влияние толщина покрытия, диаметр частиц и плотности упаковки их в слой (рис. 7).

Если принять априори, что плотность упаковки пропорциональна плотности материала, то при прочих равных или близких свойствах, например температуре плавления, рыхлый материал быстрее расплавится и испарится. Однако нанопленка нанесена на практически беспористую, плотную и монолитную стеклянную подложку с температурой плавления более 1400 °, расплавить и испарить которую достаточно трудно; это и может вызвать обнаруженный рост пороговой плотности энергии (рис. 7,в)

Существование обратно пропорциональной зависимости между объемной долей дисперсной фазы (и толщиной покрытия) и пороговой плотностью энергии лазерного микросекундного импульса (рис. 7,а) подтверждает предположение о возможной причине увеличения значения F_{bm} (микросекундный диапазон), связанной с необходимостью

испарять тугоплавкий материал подложки. Увеличение размера частиц вызывает повышение их температуры плавления [17] и закономерно требует большего количества энергии для испарения, что и подтверждается графиком на рис. 7, б.

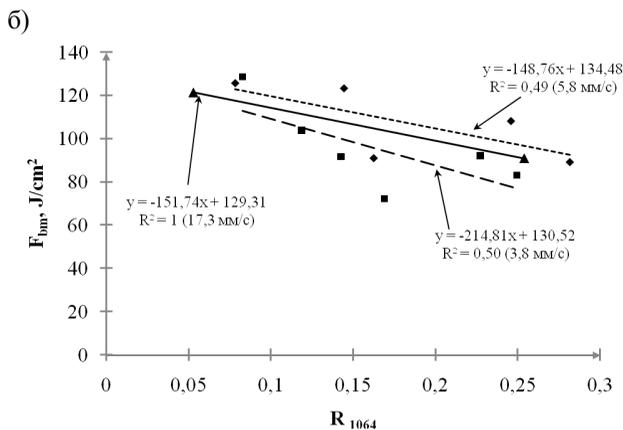
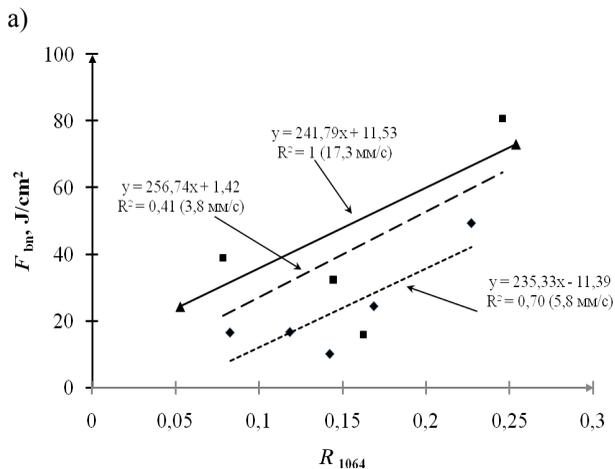
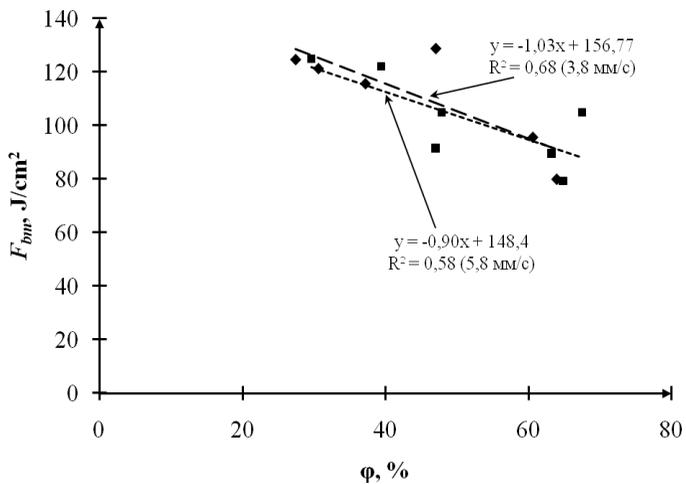
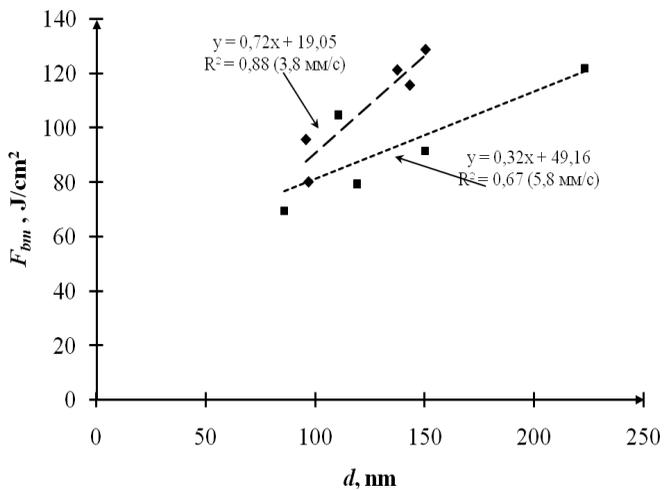


Рисунок 6 – График зависимости измеренной пороговой плотности энергии наносекундного (а) и микросекундного (б) лазерного импульса F_b от коэффициента отражения композита на длине волны 1064 нм

a)



б)



В)

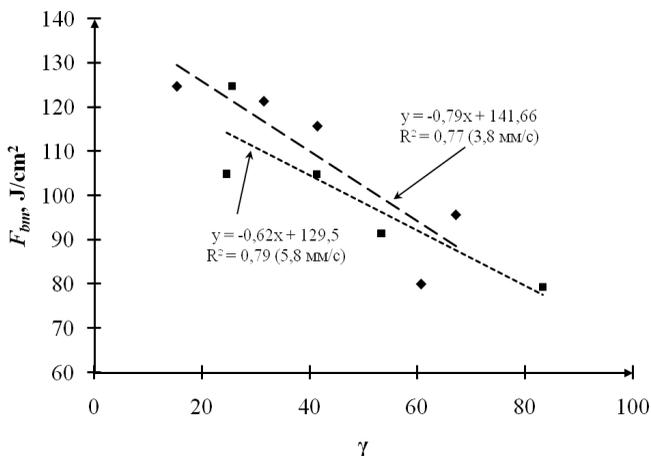


Рисунок 7 – График зависимости измеренной пороговой плотности энергии микросекундного лазерного импульса F_{bm} от характеристик пленкообразующего золя

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Экспериментально доказано, что характеристики пленкообразующих зольей оказывают заметное влияние на все изученные в рамках работы свойства стекланных композитов с наноразмерными покрытиями.

Толщина пленки прямо пропорциональна объемной доле дисперсной фазы золя, размеру частиц

Значения светопропускания T_{mid} обратно пропорциональны объемной доле дисперсной фазы золя, что может объясняться уменьшением рассеяния света на неоднородностях микроструктуры более тонкого нанопокртия.

Показано, что между плотностью упаковки частиц дисперсной фазы и увеличением объемной долей дисперсной фазы с одной стороны и показателем преломления покрытия с другой, можно проследить тенденцию к прямо пропорциональной зависимости. Это можно объяснить замедлением диффузии низкопреломляющих оксидов натрия, кальция и кремния из подложки в покрытие по мере роста его толщины и плотности.

Пороговая плотность энергии, необходимая для абляции под действием лазерного импульса наносекундной длительности,

увеличивается с ростом коэффициента отражения композита на длине волны 1064 нм.

Пороговая плотность энергии, необходимой для лазерной абляции импульсом микросекундной длительности, возрастает с увеличением размера частиц вследствие повышения температуры их плавления и уменьшается по мере роста объемной доли дисперсной фазы и плотности упаковки частиц. Обнаруженное явление объясняется малой толщиной и плотностью нанопокрyтия, вследствие чего лазерный луч практически взаимодействует с плотной и тугоплавкой стеклянной подложкой.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-09049 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Пятислойные четвертьволновые просветляющие покрытия для инфракрасного диапазона спектра / Тан Тай До, Л.А. Губанова, Э.С. Путилин, Фам Ван Хоа // Оптический журнал. 2014. Т. 81, № 10. С. 72–76.
2. Аткарская А.Б., Шеманин В.Г. Исследование потерь света в стеклянных композитах с наноразмерными покрытиями // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 7. С. 72–77.
3. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Евдокимов С.А. Перспективные высокотемпературные композиционные материалы и покрытия для авиационной техники // Стекло и керамика. 2014. № 1. С. 23–35.
4. Золь-гелевые просветляющие покрытия, получаемые методом вытягивания, на крупногабаритных изделиях из оптического стекла / М.А. Абдулкадыров, Т.А. Агеева, Н.Н. Бушина, Л.Е. Вячина, А.И. Заломленков // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 4. С. 47–80.
5. Аткарская А.Б., Чаргий П.В., Шеманин В.Г. Влияние технологических условий нанесения на свойства нанопленок системы $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 2. С. 97–101.
6. Зависимость свойств стеклянных композитов с наноразмерными покрытиями от параметров технологии их получения / А.Б. Аткарская, С.В. Карацупа, В.М. Нарцев, С.В. Зайцев, Д.С. Прохоренков, Е.И. Евтушенко // Стекло и керамика. 2013. № 10. С. 27–32.
7. Аткарская А.Б., Шеманин В.Г. Влияние вязкости пленкообразующих растворов на потери света в наноразмерных покрытиях на основе SiO_2 // Физика и химия стекла. 2014. Т. 40. № 6. С. 813–819.
8. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 513 с.

9. Цыренова С.Б., Чебунина Е.И., Балдынова Ф.П. Руководство к решению примеров и задач по коллоидной химии. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2000. 210 с.
10. Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров // В мире науки. 1984. № 3. С. 72–82.
11. Воронина Э.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Физика экстремальных состояний вещества. Черногловка: ИПХФ РАН, 2005. С. 36-37.
12. Efremov V.P., Privalov V.E., Skripov P.V. et. al. Proc. SPIE. 2005. Vol. 5447. P. 234-241.
13. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
14. Аткарская А.Б. Влияние состава золь-гель пленок на диффузию компонентов из стеклянной подложки //Стекло и керамика. 1998. №5. С. 9-11.
15. Цветное оптическое стекло и особые стекла: каталог / ред. Г.Т. Петровский. М.: Дом оптики, 1990. 227с.
16. Laser ablation of the glass nanocomposites studies / Shemanin V.G., Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V., Privalov V.E. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2014. Vol. 23. No. 4. P. 265-270.
17. Гладких Н.Т., Крышталь А.П., Богатыренко С.И. Температура плавления наночастиц и энергия образования вакансий в них // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 11. С. 111–114.