ФИЗИКА

УДК 539.234:546.26 DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_35
EDN: NPJTOH

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ

М. А. Ярмоленко[1], А. В. Рогачев[1], Д. Г. Пилипцов[1], А. А. Рогачев[2], А. С. Руденков[1]

[1]*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины*
[2]*Институт химии новых материалов Национальной Академии Наук Беларуси, Минск*

MOLECULAR STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS BASED ON ORGANOSILICON COMPOUNDS DEPOSITED BY ELECTRON-BEAM DISPERSION

M. A. Yarmolenko[1], A. V. Rogachev[1], D. G. Piliptsou[1], A. A. Rogachev[2], A. S. Rudenkov[1]

[1]*Francisk Skorina Gomel State University*
[2]*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

Аннотация. Объектом исследования явились молекулярная структура и механические свойства наноразмерных трехслойных покрытий на основе кремнийорганических соединений К-42 и ПМС-400 с внешним слоем цинка, сформированные электроннолучевым диспергированием (испарением) в вакууме, их изменения при отжиге до 600° С. Показано, что молекулярная структура покрытий ПМС-400 соответствует структуре, химическому составу исходной кремнийорганической жидкости и ее заметные изменения, в отличие от покрытий К-42, регистрируются при температуре отжига выше 200° С и при нагреве до 600° С покрытие представляет собой сшитый SiO_2 слой. Отжиг покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn при такой температуре не приводит к формированию кварцеподобной структуры, характерной для покрытий К-42 + ПМС-400, К-42, ПМС-400, что объясняется химическим взаимодействием цинка с кислородсодержащими фрагментами кремнийорганических макромолекул. Методом наноинденитирования установлены механические свойства покрытий, их значения на различных расстояниях от поверхности в зависимости от температуры отжига. Показано, что при нагреве покрытия 600° С К-42 + ПМС-400 + Zn, в отличие от однокомпонентных покрытий, регистрируется существенное снижение твердости и модуля упругости, что согласуется с результатами исследования молекулярной структуры.

Ключевые слова: *кремнийорганические покрытия*, *электроннолучевое диспергирование*, *термическая обработка*, *молекулярная структура*, *механические свойства*.

Для цитирования: *Молекулярная структура и механические свойства композиционных покрытий на основе кремнийорганических соединений, осажденных электроннолучевым диспергированием* / М. А. Ярмоленко, А. В. Рогачев, Д. Г. Пилипцов, А. А. Рогачев, А. С. Руденков // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 3 (68). – С. 35–40. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_35. – EDN: NPJTOH

Abstract. The object of the study was the molecular structure and mechanical properties of nanosized three-layer coatings based on organosilicon compounds K-42 and PMS-400 with an outer zinc layer, formed by electron beam dispersion (evaporation) in a vacuum, their changes during annealing up to 600° C. It is shown that the molecular structure of the PMS-400 coatings corresponds to the structure and chemical composition of the original organosilicon liquid and its noticeable changes, unlike K-42 coatings, are recorded at annealing temperatures above 200° C, and when heated to 600° C, the coating is a cross-linked SiO_2 layer. Annealing the K-42 + PMS-400 + Zn coating at this temperature does not result in the formation of the quartz-like structure characteristic of K-42 + PMS-400, K-42, and PMS-400 coatings. This is explained by the chemical interaction of zinc with oxygen-containing fragments of organosilicon macromolecules. Nanoindenitation was used to determine the mechanical properties of the coatings and their values at various distances from the surface, depending on the annealing temperature. It was shown that when heating the K-42 + PMS-400 + Zn coating to 600° C, in contrast to single-component coatings, a significant decrease in hardness and elastic modulus is recorded, which is consistent with the results of molecular structure studies.

Keywords: *organosilicon coatings*, *electron beam dispersion*, *heat treatment*, *molecular structure*, *mechanical properties.*

For citation: *Molecular structure and mechanical properties of composite coatings based on organosilicon compounds deposited by electron-beam dispersion* / M. A. Yarmolenko, A. V. Rogachev, D. G. Piliptsou, A. A. Rogachev, A. S. Rudenkov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 3 (68). – P. 35–40. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_35 (in Russian). – EDN: NPJTOH

Введение

Использование метода электроннолучевого диспергирования при осаждении кремнийорганических покрытий открывает широкие возможности их легирования различными соединениями независимо от их теплофизических свойств, что

© *Ярмоленко М. А.*, *Рогачев А. В.*, *Пилипцов Д. Г.*, *Рогачев А. А.*, *Руденков А. С.*, 2026

позволяет значительно расширить область практического использования [1]. Реализация данного метода имеет целый ряд технологических особенностей, обусловленных процессами взаимодействия потока электронов с материалом мишени, протекающими при этом изменениями химического состава и молекулярной структуры. Кинетические параметры данных процессов в значительной степени зависят от природы кремнийорганического соединения, режима и условий последующей, эффективно применяемой для регулирования свойств покрытий термической обработки.

Так, установлено, что высокотемпературный отжиг (более 400° С) инициирует отщепление углеводородных фрагментов кремнийорганических соединений, что в итоге сопровождается образованием кварцеподобной структуры [2]. Воздействие электронного луча на кремнийорганическую мишень вызывает не только образование летучих продуктов диспергирования, но и сопровождается образованием на ее поверхности сшитого слоя, устойчивого к термическому и радиационному воздействию. Химические реакции в мишени между продуктами разложения компонентов в значительной степени влияют на реакционную активность летучих продуктов диспергирования и способны снижать скорость нанесения. Данные особенности создают проблемы с достоверным прогнозированием структуры осаждаемого покрытия, их свойств. При этом состав, химическая активность летучих продуктов изменяется в процессе диспергирования, что определяет формирование покрытия с неоднородной молекулярной структурой. В [3] с целью повышения гомогенности осаждаемого слоя предлагается диспергированию подвергать мишень с малым, периодически восстанавливающим объемом диспергируемого материала. Следует отметить, что присутствие в объеме покрытия низкомолекулярных соединений, образующихся при осаждении продуктов диспергирования смесевых мишеней, особенно содержащих металлоорганические соединения, а также в результате полимеризации адсорбированных фрагментов, способствует образованию пор и снижению их плотности, является важной технологической проблемой.

Одним из вариантов снижения пористости покрытий и, соответственно, повышения их механических свойств является формирование слоистой структуры путем последовательного осаждения кремнийорганических соединений с несколько отличающимися кинетическими параметрами полимеризации, обеспечивающими выход низкомолекулярных соединений из объема покрытия при термообработке.

Формирование многослойных покрытий позволяет реализовать их полифункциональность. Так, использование в качестве внешнего слоя металлсодержащих органических и неорганических соединений, металлов и оксидов позволяет придать им антибактериальные свойства, более высокую отражательную способностью, радиационную стойкость. Такой технологический прием может быть реализован на примере трехслойного покрытия, содержащего слои из продуктов диспергирования кремнийорганического соединений К-42, смолы ПМС-400 и слоя Zn, толщиной соответственно 3000 Гц, 1000 Гц, 500 Гц.

Средний слой на основе ПМС-400 выбран с учетом того, что его высокотемпературный отжиг, в отличие от покрытий на основе К-42, не сопровождается образованием сшитого слоя, что облегчает диффузию образующихся при полимеризации К-42 низкомолекулярных продуктов и снижение в результате пористости покрытия. При этом присутствие в составе ПМС-400 достаточно легко отщепляющихся при нагреве метильных групп -CH_3 способствует повышению адгезионного взаимодействия между металлсодержащим и кремнийорганическим слоями. Установление молекулярной структуры, механических свойств такого покрытия, их изменений при нагревании является основной целью настоящей работы.

1 Методика эксперимента

Покрытия на основе кремнийорганических соединений формировали из летучих продуктов электроннолучевого диспергирования смолы К-42 (олигометилфенилсилоксана), кремнийорганической жидкости ПМС-400 по методике, приведенной в [1], при использовании потока электронов с энергией 800–1600 эВ и плотностью 0,01–0,03 А/см^2. Осаждение внешнего слоя осуществлялось путем испарения порошка цинка потоком электронов в едином технологическом цикле. В качестве подложек для нанесения покрытий при проведении ИК-спектроскопических исследований в проходящем излучении были использованы пластины NaCl, при оценке механических свойств – кварцевые пластины. Сформированные покрытия подвергались термообработке в атмосфере воздуха при температуре до 600° С в течение 60 минут.

Исследование молекулярной структуры нанесенных покрытий производили на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с использованием стандартной МНПВО приставки (многократное нарушенное полное внутреннее отражение). Сканирование проводили в диапазоне (4000÷500) см$^{-1}$ с разрешением 4 см$^{-1}$. В качестве отражающей призмы применяли кристалл KRS-5 (угол при основании равен 45°). Для проведения МНПВО спектроскопических исследований покрытия осаждались на пленки металлизированного лавсана. Обработку полученных спектров проводили по стандартной методике с помощью программы OPUS.

Измерение механических параметров покрытий проводили с использованием наноиндентора «НаноСкан 4D» производства ФГБНУ «ТИСНУМ» (г. Троицк, РФ). В качестве индентора использовали алмазную трехгранную пирамидку Берковича. Выбор в качестве индентора пирамиды Берковича определяется минимальным влиянием геометрии индентора на достоверность получаемых результатов, а также простотой калибровки податливости системы и формы индентора, в отличие от использования инденторов другой формы. Измерения проводили в режиме динамического механического анализа (DMA), в процессе которого на поступательное внедрение индентора накладываются гармонические колебания с частотой 20 Гц и амплитудой колебаний порядка 3 нанометров. Это вызывает формирование множества циклов нагрузки-разгрузки, в каждом из которых вычисляются значения модуля упругости и твердости. Максимальная нагрузка составляла 200 мН. С помощью данного метода определялось изменение твердости и модуля упругости с разрешением по глубине 3 нм.

Методом наноиндентирования определены значения твердости и модуля упругости. Приведенные значения твердости H (ГПа) и модуля упругости E (ГПа) представляют собой усреднённые значения, полученные в результате 15 независимых экспериментов при индентировании в режиме с линейной разверткой прикладываемой силы нагружения.

В качестве дополнительных параметров выбраны коэффициент упругого восстановления, характеризующий относительный вклад в изменение формы отпечатка (глубины и линейных размеров) упругих свойств материала, а также стойкость к упругой деформации (индекс пластичности, H / E) и стойкость к пластической деформации (H^3 / E^2) [62], [63].

2 Результаты и их обсуждение

Особенности молекулярной структуры покрытий на основе К-42 представлены в [2], [4]. Показано, что в сравнении со структурой исходной кремнийорганической смолы макромолекулы покрытия имеют меньшую концентрацию метильных заместителей. При этом молекулярная структура однокомпонентных покрытий, сформированных в условиях плазменной обработки летучих фрагментов разрушения смолы, характеризуются более высоким содержанием углеводородных заместителей. Отжиг кремнийорганических покрытий при температуре 200° С сопровождается формированием кварцеподобной структуры.

Анализ молекулярной структуры покрытий ПМС-400 методом ИК-спектроскопии показал ее соответствие в значительной степени структуре, химическому составу исходной кремнийорганической жидкости. В ИК-спектре покрытий на основе ПМС-400 присутствуют следующие полосы поглощения: 1260 $см^{-1}$ – симметричные деформационные колебания $Si – CH_3$ групп ($Si – (CH_3)_2$); 850, 800 и 767 $см^{-1}$ – $Si – (CH_3)_2$ [5], $Si – CH_3$ [6] и Si – C [7], соответственно. Поглощение при 1087 и 1020 $см^{-1}$ можно соотнести с присутствием в тонком слое SiO_2-подобных структур и Si – O – Si сшивок [6], [7]. Валентные асимметричные C – H колебания метильных групп в ИК-спектре проявляются при 2960 $см^{-1}$.

При нагреве покрытия до температуры 200° С регистрируется незначительное непрерывное снижение оптической плотности полос поглощения и ИК-спектр покрытия после отжига полностью совпадает с ИК-спектром покрытия до термообработки. Наиболее заметные изменения структуры покрытия проявляются при дальнейшем его нагреве (рисунок 2.1).

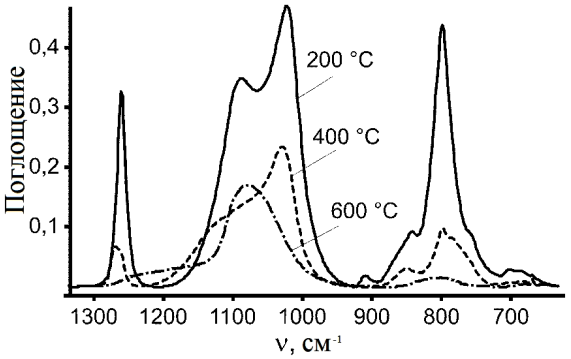


Рисунок 2.1 – ИК-спектры покрытия на основе ПМС-400 после высокотемпературного отжига (60 мин)

Согласно данным ИК-спектроскопии такой нагрев кремнийорганического тонкого слоя сопровождается отщеплением метильных заместителей, трансформацией сшитой сетчатой структуры в кварцеподобную. После отжига при 600° С покрытие представляет собой сшитый SiO_2 слой, практически полностью лишенный углеводородных заместителей.

Количественные параметры, характеризующие изменения молекулярной структуры при отжиге покрытий К-42, ПМС-400 и К-42 + ПМС-400 + Zn, представлены в таблице 2.1. В качестве внутреннего стандарта была выбрана полоса поглощения при 1135 $см^{-1}$ (O – Si – O).

Провести ИК-анализ не термообработанной слоевой системы К-42 + ПМС-400 + Zn не представляется возможным, так как внешний металлический слой является непрозрачным для ИК-излучения. После отжига при 450 °С цинк окисляется и становится прозрачным. Согласно ИК-исследованиям, нагрев слоевой системы не приводит к росту доли O – Si – O сшивок.

Таблица 2.1 – Результаты ИК-анализа кремнийорганических покрытий

Тип покрытия	Тип химических связей					
	Si – O – Si cage (1100 см$^{-1}$)	SiO_2-like structure (1065 см$^{-1}$)	Si – O – Si network (1025 см$^{-1}$)	Si – O – C (997 см$^{-1}$)	Si – $(CH_3)_2$ (850 см$^{-1}$)	Si – CH_3 (800 см$^{-1}$)
К-42	1,74	1,80	1,78	0,90	0,29	0,94
К-42 + отжиг	1,14	1,96	3,29	0,50	0,30	0,69
ПМС-400	3,05	3,14	4,94	0,64	0,83	3,88
ПМС-400 + отжиг	0,80	2,22	2,02	0,19	0,23	0,32
К-42 + ПМС-400 + Zn (отжиг, 450° С)	1,28	1,83	1,80	0,90	0,11	0,34
К-42 + ПМС-400 + Zn (отжиг, 600° С)	0,87	1,72	–	3,80	1,03	–

Таблица 2.2 – Механические характеристики покрытий

Тип покрытия	$H_{ср}$, ГПа	$E_{ср}$, ГПа	H / E	H^3 / E^2	η_{IT}, %		
					P_1, мН	P_2, мН	P_3, мН
К-42 (450° С)	3,98	54,3	0,073	0,021	37,5	38,6	39,5
К-42 + ПМС + Zn	3,11	56,2	0,055	0,009	29,7	30,5	32,3
К-42 + ПМС + Zn (450° С)	2,45	34,7	0,071	0,012	14,5	31,3	27,3
К-42 + ПМС + Zn (600° С)	1,23	28,1	0,043	0,002	27,8	27,1	20,2

В слоевой системе снижено и содержание углеводородных фрагментов в сравнении с покрытиями на основе кремнийорганической смолы и жидкости после отжига. Более высокая температура отжига сопровождается дополнительным разрушением O – Si – O сшивок. В молекулярной структуре кремнийорганической составляющей трех-слойного покрытия отсутствуют сшивки типа «сетка». Наблюдается рост содержания Si – O – C и Si – OH (967 см$^{-1}$) связей. В ИК-спектре происходит смещение поглощения в область более низких значений волновых чисел (рисунок 2.2).

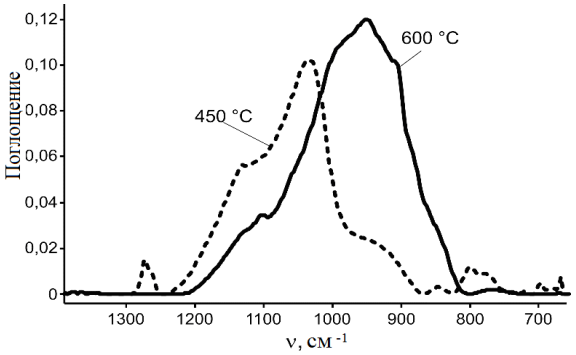


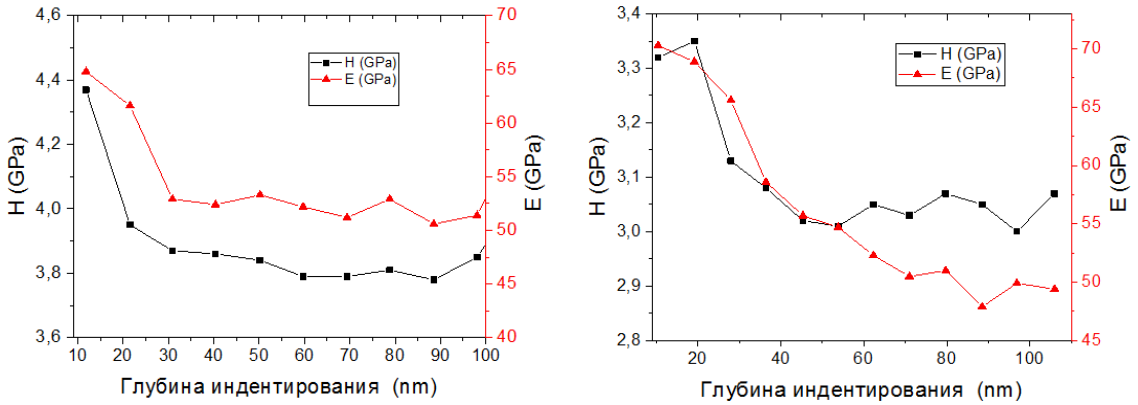
Рисунок 2.2 – Влияние температуры отжига на ИК-спектр трехслойного покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn

Таким образом, отжиг покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn не приводит к формированию кварцеподобной структуры, характерной для покрытий К-42 + ПМС-400, К-42, ПМС-400. Наиболее вероятным объяснением данного эффекта является проявление химического взаимодействия цинка с кислородсодержащими фрагментами кремнийорганических макромолекул и разрушение сшитой структуры кремнийорганического соединения.

Данные структурные особенности покрытий после термообработки сказываются на их механических свойствах, определенных методом наноиндентирования (рисунки 2.3, 2.4, таблица 2.2). Установленные зависимости изменения глубины индентирования от приложенной нагрузки (кривые нагружения-разгружения) для покрытий при различных нагрузках использовались для определения величины максимальной глубины индентирования h_{max} и остаточной глубины отпечатка Δh при трех различных значениях максимальной нагрузки, согласно которых рассчитывали коэффициент упругого восстановления. Данные нагрузки на индентор обеспечивали максимальные глубины вдавливания порядка 40 нм, 100 нм и 150 нм, что позволило определить упругие свойства в различных поверхностных слоях.

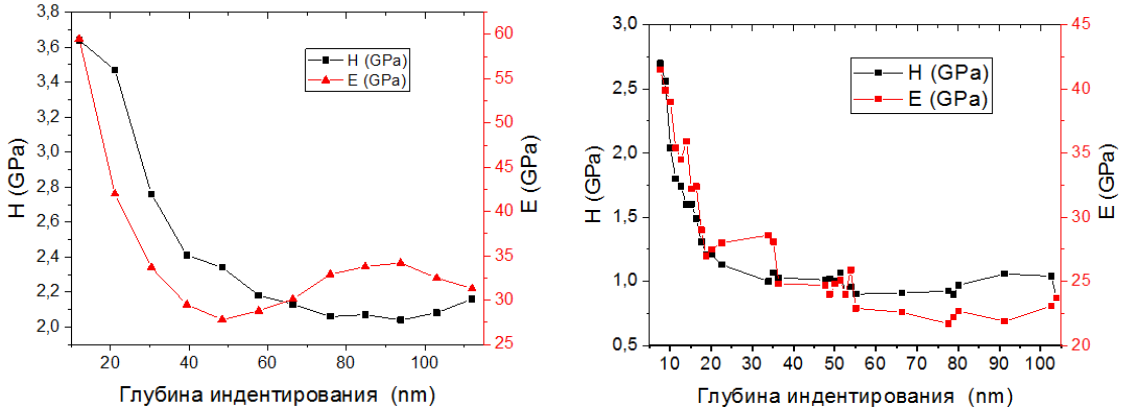
Однокомпонентные покрытия на основе кремнийорганической смолы и кремнийорганической жидкости перед измерением подвергались отжигу при 450° С. Твердость покрытия на основе кремнийорганической смолы К-42 в среднем составляет 3,98 ГПа (рисунок 2.3, *а*). Твердость покрытий на основе ПМС не определялась, так как его толщина соизмерима с глубиной внедрения индентора.

Анализ представленных зависимостей твердости и модуля упругости (рисунки 2.3 и 2.4) показывает, что для них, независимо от состава покрытия, характерно монотонное снижение значений в слое толщиной до 30..60 нм и в объемных слоях регистрируются относительно незначительные их изменения.



а) *б*)

Рисунок 2.3 – Зависимость твердости и модуля упругости от глубины индентирования покрытия К-42 после отжига при 450° С (*а*), К-42 + ПМС-400 + Zn до отжига (*б*)



а) *б*)

Рисунок 2.4 – Зависимость твердости и модуля упругости трехслойного покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn от глубины индентирования после отжига при 450° С (*а*), 600° С (*б*)

Снижение модуля упругости в объемных слоях покрытия свидетельствует о повышении их эластичности, а заметные немонотонные изменения его значения обусловлены неоднородностью и пористостью объемных слоев [8].

Твердость покрытия, сформированного последовательным нанесением слоев на основе К-42, ПМС и Zn и не подвергнутого отжигу, заметно ниже твердости покрытия на основе кремнийорганической смолы (рисунок 2.3, *б*). Снижение твердости обусловлено присутствием в покрытии среднего слоя на основе кремнийорганической жидкости ПМС-400. Отжиг при 450° С сопровождается снижением твердости трехслойного покрытия до 2,45 ГПа (рисунок 2.4, *а*). При этом, согласно результатам ИК-исследованиям, термообработка не приводит к формированию сшитой структуры. Снижение доли сшитых структур в кремнийорганическом компоненте трехслойного покрытия, образование структурных дефектов и является основной причиной снижения твердости.

При температуре отжига покрытия 600° С регистрируется дальнейшее существенное снижение твердости и модуля упругости (рисунок 2.4, *б*), что подтверждает установленное при анализе молекулярной структуры методом ИК-спектроскопии влияние термически инициируемых взаимодействий цинка с кремнийорганическими фрагментами и вызванные этими процессами затруднения в формировании кварцеподобных структур.

Исследованные тонкие слои характеризуются индексом пластичности H / E, лежащим в диапазоне от 0,05 до 0,08, характерном для мелкокристаллических и наноразмерных структур [9], [10]. С ростом температуры отжига трехслойных покрытий наблюдается нелинейное изменение этого отношения. Это связано со структурными превращениями, обусловленными химическим межслойным взаимодействием, процессами окисления компонентов покрытия кислородом воздуха. Установленные высокие значения H, E, H / E и коэффициента упругого восстановления η_{IT} анализируемых кремнийорганических покрытий дают основание прогнозировать их высокую износостойкость при трении [11].

Заключение

Определены особенности молекулярной структуры и механические свойства композиционных кремнийорганических покрытий К-42 + ПМС-400 + Zn, их изменения при нагревании. Методом ИК-спектроскопии показано, что молекулярная структура покрытий, осажденных электроннолучевым диспергированием ПМС-400, соответствует структуре и химическому составу исходной кремнийорганической жидкости. Заметные изменения структуры покрытий ПМС-400, в отличие от покрытий К-42, регистрируются при температуре отжига выше 200° С, и при нагреве до 600° С покрытие представляет собой сшитый SiO_2 слой, практически полностью лишенный углеводородных заместителей. Отжиг покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn при такой температуре не приводит к формированию кварцеподобной структуры, характерной для покрытий К-42 + ПМС-400, К-42, ПМС-400. Наиболее вероятным объяснением данного эффекта является проявление химического взаимодействия цинка с кислородсодержащими фрагментами кремнийорганических макромолекул и возникающие при этом ограничения в формировании сшитой структуры кремнийорганического соединения.

Методом наноиндентирования установлены механические свойства покрытий, их значения по толщине слоя и зависимость от температуры отжига. Установлено, что при температуре отжига 600° С покрытия К-42 + ПМС-400 + Zn, в сравнении с однокомпонентными покрытиями К-42 и ПМС-400, регистрируется существенное снижение твердости и модуля упругости, что согласуется с результатами ИК-спектроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Микро- и нанокомпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые их активной газовой фазы* / М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, П. А. Лучников [и др.]. – М. : Радиотехника, 2016. – 424 с.

2. *Влияние плазменной обработки покрытий на основе кремнийорганических полимеров*, *осажденных методом электроннолучевого диспергирования*, *на их структуру и морфологию* / М. А. Ярмоленко, О. А. Саркисов, Имин Лю, А. В. Рогачев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 1 (46). – С. 38–43.

4. *Способ получения полимерного покрытия* : а. с. 1695568 СССР : МПК B05D 1/02 / А. В. Рогачев, В. П. Казаченко, В. П. Михайлов, Б. А. Камарицкий, В. Н. Спектор ; заявитель Гомельский государственный университет. – № 4690382 ; заявл. 10.05.1989 ; опубл. 15.11.1991, Бюл. № 42.

4. *Особенности деградации полимерных материалов при воздействии коротковолнового лазерного излучения* / М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, Имин Лю [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 49–54.

5. *Polysiloxane-Modified Mesoporous Materials* / K. Noble, M. L. P. M. A. S. Seddon, A. B. Seddon, K. M. K. Swamy // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2000. – Vol. 19. – P. 807–810.

6. *Handke*, *M*. Siloxane and silsesquioxane molecules – Precursors for silicate materials / M. Handke, A. Kowalewska // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2011. – Vol. 79. – P. 749–757.

7. *The role of organoclay on the properties of Polymethylsilsesquioxane*: *A systematic study* / A. S. Alex, A. K. Mohanty, A. K. Bhowmick, S. K. Nayak // Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 54, № 12. – P. 885–893.

8. СТБ 2495-2017. *Контроль неразрушающий*. *Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования*. – Введ. 01.09.2017. – Минск : БелГИСС : Госстандарт, 2017. – 40 с. – (Государственный стандарт Республики Беларусь).

9. *Lawn*, *B. R*. Elastic recovery at hardness indentations / B. R. Lawn, V. R. Howes // Journal of Materials Science. – 1981. – Vol. 16. – P. 147–151.

10. *Горбань*, *В. Ф*. Идентификация структурного состояния материалов методом автоматического индентирования / В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, С. А. Фирстов // Наноструктурные материалы : сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи. – Харьков, 2007. – Т. 1. – С. 52–55.

11. *Nanoindentation measurements on modified diamond-like carbon thin films* / N. Dwivedi, S. Kumar, S. A. R. Hashmi, C. M. S. Rauthan // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – P. 9953–9959.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР 26-18/1 «*Разработка основ плазмохимической технологии формирования и состава наноразмерных композиционных гидрофобных покрытий на основе кремнийорганических полимеров с высокими антибактериальными и механическими свойствами*», *комплексное задание* 2.9.1 ГПНИ «*Современное материаловедение*, *перспективные материалы и новые технологии*».

Поступила в редакцию 15.06.2026.

Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., профессор
Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.н., профессор
Пилипцов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., доцент
Рогачёв Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор
Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент