УДК 66.095.26+533.924

Органические плёнки, синтезированные на поверхности железа в низкотемпературной плазме адамантана

А. А. Шаков¹, С. Ф. Ломаева¹, В. А. Поздеев^{1,2}, А. А. Шушков^{1,3}, А. В. Вахрушев^{1,3}

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

³ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7

Аннотация. В работе исследованы тонкие полимерные плёнки, полученные в плазме паров адамантана на поверхности железа. Определены толщина, морфология, химический состав плёнок, поверхностная энергия и физико-механические свойства: твёрдость; приведённый модуль упругости; параметр упругого восстановления; податливость; работа, затрачиваемая на упругую и пластическую деформацию. Показано, что физико-механические свойства полученных плёнок близки к свойствам образцов полиэтилена высокого и низкого давления.

Ключевые слова: адамантан, низкотемпературная плазма, плазменная полимеризация, высокочастотный разряд, тонкая плёнка, наноиндентирование.

✉ Анатолий Шаков, e-mail: toluol@yahoo.com

Organic Films Synthesized on the Iron Surface in Low-Temperature Plasma of Adamantane

Anatoly A. Shakov¹, Svetlana F. Lomayeva¹, Vjacheslav A. Pozdeev^{1,2}, Andrey A. Shushkov^{1,3}, Alexander V. Vakhrushev^{1,3}

¹ Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

² Udmurt State University (1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russian Federation)

³ Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya St., Izhevsk, 4260069, Russian Federation)

Summary. In this paper, thin polymer films obtained on iron substrates in low-temperature plasma of adamantane vapor were studied by SEM, AFM, ESCA, contact angle measurements and nanoindentation. It is shown that the films have a thickness about 1-2 micrometers and a columnar structure (the diameter of the "columns" is 50-100 nm). The surface energy of the films is close to the energy of low-polar organic polymers. The composition of the thin surface layer includes carbon (partially as peroxide groups), oxygen (as peroxide groups only) and a small amount of nitrogen (as amino groups). The reason for the appearance of such a significant concentration of oxygen is the secondary reaction of the film free radicals with atmospheric oxygen. The thickness, morphology, chemical composition, surface energy and some physico-mechanical properties such as hardness, reduced modulus of elasticity, elastic recovery parameter, compliance, elastic deformation work and plastic deformation work of the films are determined. It is also shown that the properties of the obtained films are close to the properties of LDPE and HDPE samples.

Keywords: adamantane, low-temperature plasma, plasma polymerization, radio frequency discharge, thin film, nanoindentation.

✉ Anatoly Shakov, e-mail: toluol@yahoo.com

ВВЕДЕНИЕ

Адамантаны с их уникальной алмазоподобной молекулярной структурой являются интересными и перспективными веществами. Классические полимеры адамантана обладают рядом таких уникальных свойств, как термостабильность, прозрачность и химическая инертность [1, с. 247-250]. В то же время из адамантана и его производных получают алмазоподобные плёнки, лишь в три раза уступающие алмазу по твёрдости [1, с. 243], а также высокочистые нелегированные нано- и микрокристаллы алмаза [2].

Органические плёнки, получаемые методом полимеризации в плазме, характеризуются малой толщиной (порядка микрометров), высокой сплошностью (отсутствием дефектов), хорошей адгезией к подложке, а также термостабильностью и низкой растворимостью в органических веществах. Нанесение плёнок в плазме является более удобной и экологичной альтернативой нанесению покрытий из растворов и расплавов.

Сочетание необычных свойств классических полимеров адамантана с преимуществами плазменной полимеризации делает синтез и изучение свойств плазмополимеров адамантана достаточно перспективным направлением [3 – 6]. Однако, как показал анализ литературы практически отсутствуют систематические исследования химических, физических и механических свойств пленок, синтезированных из плазмы адамантана.

Цель работы – синтез полимерной плёнки из плазмы адамантана на поверхности железа и изучение её свойств – толщины, морфологии, химической структуры, поверхностной энергии, физико-механических параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подложки представляли собой полированные пластинки АРМКО-железа (99.95 % Fe) размером 15×8×2 мм. В качестве мономера для плазменной полимеризации применяли адамантан (99+%) производства Sigma-Aldrich.

Проточный реактор, изготовленный из кварцевого стекла, (общая схема которого приведена на рис. 1) для получения плазмополимеризованных пленок имел объем 0.2 дм³ и наружное расположение электродов, выполненных из листовой меди.

Рис. 1. Общий вид установки для получения плазмополимеризованной плёнки:
1 – форвакуумный насос, 2 – вакуумная магистраль, 3 – стеклянный реактор, 4 – образцы,
5 – электроды, 6 – термомпара, 7 – ВЧ-генератор

Fig. 1. Schematic representation of the plasma polymerization apparatus: 1 – vacuum pump, 2 – vacuum line,
3 – quartz glass reactor, 4 – samples, 5 – electrodes, 6 – thermocouple, 7 – RF generator

В качестве источника высокочастотного поля использовали генератор "УВЧ-66", позволяющий получать ВЧ-разряд мощностью до 7 Вт при фиксированной частоте 40.68 МГц. Мощность ВЧ-разряда в эксперименте составила 40 Вт. Температуру образцов в процессе эксперимента контролировали хромель-алюмелевой термопарой. Пары адамантана получали из кристаллической фазы методом температурной сублимации. Парциальное давление паров адамантана в реакторе во время проведения плазменной полимеризации 30 Па. Предварительно реактор продували парами адамантана в течение 4 мин для удаления остаточного воздуха. Время плазмообработки составило 6 мин. Температура образцов в процессе эксперимента достигала 123 °С. После окончания полимеризации образцы перед выносом на воздух охлаждали в парах адамантана до достижения температуры 40 °С (около 6 минут).

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) выполнена на микроскопе VEGA3 TESCAN.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) реализована на приборе P47-Solver в полуконтактном (tapping) режиме с использованием кремниевой консоли.

Измерение толщины плёнки и физико-механических свойств производили методом наноиндентирования на приборе NanoTest 600 с использованием алмазного индентора Берковича с углом при вершине 65.3° и радиусом закругления около 200 нм.

При измерении толщины предельное усилие нагрузки составляло 20 мН, время нагрузки и разгрузки 40 с. При определении физико-механических свойств плёнки максимальная величина нагрузки, прикладываемой к алмазному наконечнику, не превышала 0.25 мН. Время нагрузки и разгрузки 20 с. Это позволило исключить влияние механических свойств железной подложки на получаемые результаты. Был проанализирован участок плёнки (400×400) мкм вблизи центра образца. Расстояние между точками индентирования (всего 25 точек) составляло 100 мкм. Время выдержки при максимальной нагрузке 10 с. Все испытания проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011. Расчет твердости и приведенного модуля упругости плёнки выполняли по методике Оливера-Фарра [7]. Параметр упругого восстановления вычисляли как отношение разности максимальной и пластической глубин к пластической глубине проникновения алмазного индентора. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) выполнена на спектрометре ЭС-2401. Вакуум в камере анализатора 10^{-5} Па. Значение энергии связи линии C1s-электронов в алкильной группе принимали равным 285.0 эВ. Анализ РФЭ-спектров осуществляли согласно [8, 9].

Определение поверхностной энергии плёнок осуществляли расчетным путём при помощи определения краевого угла смачивания двумя тестовыми жидкостями (дистиллированной водой и диметилсульфоксидом), исходя из величин полярной и дисперсионной составляющих их поверхностного натяжения и геометрических параметров их капель [10]. Температура проведения эксперимента 24 °С, атмосферное давление 750 мм рт.ст., относительная влажность воздуха 35 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптические исследования показали, что образцы окрашены в радужные цвета. Окраска, очевидно, вызвана интерференцией, которая имеет место в тонких плёнках, в таком случае толщина плёнки должна быть близка к длине волны видимого света, то есть, около одного микрометра.

Типичное изображение плёнки, полученное с помощью СЭМ, представлено на рис. 2.

На отдельных участках по краям образца видны образования размером около 50 мкм, которые появляются вследствие отслоения плёнки от подложки (рис. 2, а). В основном морфология пленок повторяет рельеф полированной поверхности подложки (рис. 2, б). Присутствуют отдельные сферические образования размером около 1 мкм.

По всей вероятности, они являются дисперсными частицами плазмополимера, осажденными на поверхность подложки [5].

Изображения гладких участков, полученные при помощи атомно-силовой микроскопии, представлены на рис. 3.

Рис. 2. СЭМ-изображения плазмополимеризованной плёнки

Fig. 2. SEM images of the plasma polymerized film

Рис. 3. АСМ-изображения плазмополимеризованной плёнки

Fig. 3. AFM images of the plasma polymerized film

При сравнимых масштабах изображений результаты АСМ и СЭМ аналогичны (см. рис. 2, *b* и 3, *a*). Плёнка растёт равномерно, повторяя морфологию поверхности подложки, темные полосы – углубления (царапины) на подложке, появившиеся в результате полировки. АСМ-изображения дают дополнительную информацию – на изображениях виден столбчатый характер плёнки (рис. 3, *b-d*). Диаметр столбиков – 50 – 100 нм.

Определение толщины плёнок проводили методом наноиндентирования (рис. 4) на участке образца (5×5 измерений с шагом 100 мкм). Было показано что плёнки имеют толщину 1–2 мкм, что согласуется с наличием оптических эффектов (интерференции) плёнок.

Рис. 4. Типичная зависимость усилия внедрения наноиндентора от глубины его погружения (кривая "нагрузка – разгрузка") для образца плёнки на железной подложке. Предельное усилие нагрузки 20 мН

Fig. 4. A typical load-displacement curve for the sample of plasma polymerized film deposited on an iron substrate. The maximum force is 20 mN

По данным РФЭС (рис. 5, *a*) в поверхностном слое плёнки присутствуют три элемента: углерод (84 ат.%), кислород (14 ат.%), а также следовое количество азота (около 2 ат.%). Сигнал железа от подложки не выявлен. Это позволяет сделать вывод, что плёнка сплошная, без разрывов.

Наличие азота в составе плёнки объясняется присутствием некоторого количества воздуха в реакционном объеме, по-видимому, вследствие недостаточной продувки реактора парами адамантана перед проведением полимеризации. Обращает на себя внимание относительно высокое содержание кислорода в анализируемом слое плёнки – 14 ат.% против 2 ат.% для азота, хотя объёмное соотношение «кислород-азот» в атмосферном воздухе 1:4. Причина этого, вероятно, во взаимодействии свободных радикалов, образовавшихся во время плазменной полимеризации, с молекулами кислорода при выносе образцов на воздух. При этом образуются пероксидные группы ($-C-O-O-$) [11].

Анализ рентгенофотозлектронных спектров высокого разрешения, основанный на работах [8, 9], выявил следующее (рис. 5, *b-d*).

Углерод, входящий в состав поверхностного слоя образца, представлен нефункциональным углеродом (89 % фрагментов $-CH_2-$, энергия связи $E_{св} = 285$ эВ), а также углеродом, входящим в состав кислородсодержащих групп (11 % групп C-O, $E_{св} = 287.2$ эВ) – спиртовой, эфирной или пероксидной.

Рис. 5. РФЭ-спектры плазмополимеризованной плёнки: а) обзорный; б) C1s; в) O1s; д) N1s

Fig. 5. XPS spectra of the plasma polymerized film: a - wide-scan spectrum, b,c,d - high-resolution C1s, O1s, N1s spectra, respectively

O1s-спектр представляет собой одиночную линию, положение которой ($E_{\text{св}} = 533$ эВ) также соответствует спиртовой, эфирной либо пероксидной группам. Если бы в реакцию с полимером вступал кислород в виде плазмы, то, наряду с образованием связей C-O, неизбежно было бы появление связей C=O [11]. В этом случае C1s- и O1s-спектры также содержали бы линии, указывающие на присутствие C=O-связей, характерных для карбонильных или карбоксильных групп ($E_{\text{св}} = 288 - 289$ эВ и 532 эВ, соответственно). Поэтому из всех групп, содержащих C-O-связь, в условиях эксперимента, вероятнее всего, образуются именно пероксидные группы.

N1s-спектр также представлен одиночной линией, свидетельствующей о присутствии аминогруппы в составе анализируемого слоя [8]. Наиболее вероятно, что азот в форме аминогруппы, образовавшейся из молекулярного азота [11], встраивается в полимерную плёнку только во время горения плазменного разряда, поскольку молекула азота, в отличие от молекулы кислорода, обладает весьма высокой термодинамической стабильностью. В связи с этим самопроизвольное образование связи C-N из азота воздуха при комнатной температуре (аналогично пероксидным связям) маловероятно.

По данным, полученным методом измерения краевого угла смачивания, величины краевых углов (θ_0) на поверхности плазмополимеризованной плёнки составили:

$$\text{H}_2\text{O}: \theta_0 = (84.7 \pm 0.9)^\circ \quad \text{ДМСО}: \theta_0 = (27.6 \pm 0.3)^\circ$$

Та же величина, $\theta = 85^\circ$, была получена для краевого угла смачивания водой плёнки плазмополимеризованного адамантана на плоских поверхностях в работе [12]. Исходя из краевых углов смачивания водой и ДМСО расчетные величины дисперсионной и полярной компонент поверхностной энергии плазмополимеризованной плёнки, а также их сумма составили, соответственно:

$$\gamma^d = (38.5 \pm 0.8) \text{ мДж/м}^2$$

$$\gamma^p = (2.3 \pm 0.4) \text{ мДж/м}^2$$

$$\gamma = (41.8 \pm 1.2) \text{ мДж/м}^2.$$

Такие величины поверхностной энергии характерны для малополярных органических полимеров, таких, например, как полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид [13, с. 33].

При анализе хода 25 кривых "нагрузка – разгрузка" (рис. 6), полученных методом наноиндентирования плёнки, были вычислены значения следующих физико-механических параметров (доверительная вероятность $P = 0.9545$):

- твердость $H = (62 \pm 18) \text{ МПа}$;
- приведенный модуль упругости $E_r = (310 \pm 90) \text{ МПа}$;
- параметр упругого восстановления $ERP = (h_{\max} - h_{pl})/h_{pl} = (930 \pm 180) \text{ МПа}$;
- податливость (обратная величина жесткости) $C = (1900 \pm 300) \text{ нм/мН}$;
- работа, затрачиваемая на упругую деформацию $W_{el} = (0.046 \pm 0.004) \text{ нДж}$;
- работа, затрачиваемая на пластическую деформацию $W_{pl} = (0.028 \pm 0.006) \text{ нДж}$.

Рис. 6. Типичная зависимость усилия внедрения наноиндентора от глубины его погружения в образец: а) исходная; б) сглаженная. Предельное усилие нагрузки 0.25 мН

Fig. 6. A typical load-displacement curve the plasma polymerized film deposited on an iron substrate: a – initial; b – smoothed. The maximum force is 0.25 mN

Анализ литературы показал, что плёнка, полученная в плазме паров адамантана на поверхности железа, обладает твёрдостью, близкой к твёрдости полиэтилена низкого давления (ПЭНД), определенной по Бринеллю [14, с. 45]. В то же время величина её приведенного модуля упругости скорее ближе к таковой для полиэтилена высокого давления (ПЭВД) [15, с. 239], см. также таблицу. Сравнение величины твердости образца полиэтилена, полученной по Бринеллю [14], и на установке NanoTest 600 с использованием индентора Берковича [16], показало, что результаты в пределах погрешности одинаковы. Это позволяет корректно сравнивать данные, получаемые двумя вышеуказанными методами.

Таблица. Механические свойства плазмополимеризованной плёнки в сравнении с полиэтиленом

Table. The mechanical properties of the plasma polymerized film in comparison with polyethylene

Образец Sample	Плазмополимеризованная плёнка адамантана The plasma polymerized film of adamantane	ПЭНД High-density polyethylene	ПЭВД Low-density polyethylene
Твердость, МПа Hardness, MPa	62 ± 18	49 – 68 [14]	17-25 [15], 25 ± 1 [16]
Приведенный модуль упругости, МПа Reduced modulus of elasticity, MPa	310 ± 90	550 – 800 [15]	150 – 250 [15]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы полимерные плёнки в плазме паров адамантана толщиной 1 – 2 мкм на поверхности АРМКО-железа. Методом атомно-силовой микроскопии показано, что плёнки имеют столбчатую структуру, диаметр столбиков – 50 – 100 нм.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, что в состав поверхностного слоя плёнок входят 84 ат.% углерода (нефункционального и в составе пероксидных групп), 14 ат.% кислорода (в составе пероксидных групп), а также следовое количество, 2 ат.%, азота (в виде аминогрупп).

Причиной появления столь значительной концентрации кислорода в плёнках является протекание реакции свободных радикалов плёнки с кислородом воздуха при выносе пленок на воздух. При этом азот встраивается в полимерную плёнку во время горения плазменного разряда.

Поверхностная энергия полученных плёнок близка к поверхностной энергии малополярных органических полимеров и составляет примерно 41 мДж/м².

С применением наноиндентирования получены параметры физико-механических свойств синтезированной плёнки: твердость $H = (62 \pm 18)$ МПа; приведенный модуль упругости $E_r = (310 \pm 90)$ МПа; параметр упругого восстановления $ERP = (930 \pm 180)$ МПа; податливость (обратная величина жесткости) $C = (1900 \pm 300)$ нм/Н; работа, затрачиваемая на упругую деформацию $Wel = (0.046 \pm 0.004)$ нДж; работа, затрачиваемая на пластическую деформацию $Wpl = (0.028 \pm 0.006)$ нДж.

Выявлено, что плёнки обладают твёрдостью, сравнимой с твёрдостью полиэтилена низкого давления, и приведенным модулем упругости, близким к приведенному модулю упругости полиэтилена высокого давления.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (№ темы 121030100003-7 и 0427-2019-0029).

The research was carried out with the support of the ministry of science and higher education of the Russian Federation (No. 121030100003-7 and u 0427-2019-0029).

При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of the UdmFRC UB RAS.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Гильмутдинову В.Ф. за участие в создании и вводе в эксплуатацию установки по получению плазмополимеризованных плёнок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багрий Е. И. Адамантаны: получение, свойства, применение. М.: Наука, 1989. 263 с.
2. Екимов Е. А., Кондрина К. М., Мордвинова Н. Е., Лебедев О. И., Пастернак Д. Г., Власов И. И. Особенности синтеза наноалмаза из адамантана при высоких давлениях и температурах // Неорганические материалы. 2019. Т. 55, № 5. С. 475-480. <https://doi.org/10.1134/S0002337X1905004X>
3. Tiwari R. N., Chang L. Growth, Microstructure, and Field-Emission Properties of Synthesized Diamond Film on Adamantane-Coated Silicon Substrate by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition // Journal of Applied Physics, 2010, vol. 107, 103305. <https://doi.org/10.1063/1.3427436>
4. Tiwari R. N., Tiwari J. N., Chang L. The Synthesis of Diamond Films on Adamantane-Coated Si Substrate at Low Temperature. // Chemical Engineering Journal, 2010, vol. 158, pp. 641-645. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.024>
5. Андреева А. В., Зынь В. И., Сафонов А. А., Шацкий А. В., Штеренберг А. М. Полимеризация паров адамантана в тлеющем разряде // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4. С. 84-90.
6. Сафонов А. А. Кинетика формирования и свойства нано- и микроструктур полимеров, синтезируемых в разряде пониженного давления в парах адамантана: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Самара, 2012. 152 с.
7. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // Journal of Materials Research, 1992. no. 7(6), pp. 1564-1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
8. Beamson G., Briggs D. High Resolution XPS of Organic Polymers. The Scienta ESCA300 Database. John Wiley & Sons. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. 1992. 287 p.
9. Повстугар В. И., Шаков А. А., Михайлова С. С., Воронина Е. В., Елсуков Е. П. Разложение сложных рентгенофотозлектронных спектров с помощью быстрого дискретного преобразования Фурье и улучшенной процедурой сходимости решения. Оценка применимости методики // Журнал аналитической химии. 1998. Т. 53, № 8. С. 795-799.
10. Ляхович А. М., Шаков А. А., Лялина Н. В. Влияние влажности среды на значения краевых углов смачивания поверхностей с различной гидрофильностью // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. Т. 46, № 5. С. 461-466.
11. Friedrich J. The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces: Advanced Techniques for Surface Design. Weinheim: Wiley. 2012. Chapter 2. Interaction between Plasma and Polymers, pp. 15-25. <https://doi.org/10.1002/9783527648009.ch2>
12. Martín M. A. Remote Plasma Assisted Fabrication of Functional Organic and Hybrid Thin Films and Supported Nanostructures. A thesis submitted for the degree of PhD. Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (US-CSIC). Universidad de Sevilla, 2015. 345 p.
13. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия. 1969. 320 с.
14. Химическая энциклопедия / Под ред. Н.С. Зефирова. В пяти томах. Т. 4. М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. 641 с.
15. Энциклопедия полимеров / Под ред. В.А. Кабанова. В трех томах. Т. 2: Л – Полинозные волокна. М.: Советская Энциклопедия, 1974. 514 с.
16. Ляхович А. М., Шушков А. А., Лялина Н. В., Дитятьев А. В. Прочностные свойства наноразмерных полимерных пленок, полученных в низкотемпературной плазме бензола // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, № 2. С. 243-247.

REFERENCES

1. Bagrij E. I. *Adamantany: poluchenie, svojstva, primeneniye* [Adamantanes: preparation, properties, application]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 263 p.
2. Ekimov E. A., Kondrina K. M., Mordvinova N. E., Lebedev O. I., Pasternak D. G., Vlasov I. I. High-pressure, High-temperature Synthesis of Nanodiamond from Adamantane. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 437-442. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S00020168519050042>
3. Tiwari R. N., Chang L. Growth, Microstructure, and Field-Emission Properties of Synthesized Diamond Film on Adamantane-Coated Silicon Substrate by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 107, 103305. <https://doi.org/10.1063/1.3427436>
4. Tiwari R. N., Tiwari J. N., Chang L. The Synthesis of Diamond Films on Adamantane-Coated Si Substrate at Low Temperature. *Chemical Engineering Journal*. 2010, vol. 158, pp. 641-645. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.024>
5. Andreeva A. V., Zyn V. I., Safonov A. A., Shatskiy A. V., Shterenberg A. M. Polimerizaciya parov adamantana v tleyushchem razryade [Glow discharge polymerization of the adamantane]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4, pp. 84-90. (In Russian).

6. Safonov A. A. *Kinetika formirovaniya i svoystva nano- i mikrostruktur polimerov, sinteziruemykh v razryade ponizhennogo davleniya v parah adamantana*: Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Kinetics of Formation and Properties of Nano- and Microstructures of Polymers Synthesized in a Low-pressure Discharge in Adamantane Vapor. PhD thesis (Phys.-Math.)]. Samara, 2012, 152 p. (In Russian).
7. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*, 1992. no. 7(6), pp. 1564-1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
8. Beamson G., Briggs D. *High Resolution XPS of Organic Polymers. The Scienta ESCA300 Database*. John Wiley & Sons. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. 1992. 287 p.
9. Povstugar V. I., Shakov A. A., Mikhailova S. S., Voronina E. V., Elsukov E. P. Resolution of Complex X-ray Photoelectron Spectra Using Fast Discrete Fourier Transformation with Improved Convergence Procedure: Assessment of the Usability of the Procedure. *Journal of Analytical Chemistry*, 1998, vol. 53, no. 8, pp. 697-700. (In Russian).
10. Lyakhovich A. M., Shakov A. A., Lyalina N. V. Effect of Ambient Humidity to Wetting Angles of Various Hydrophilic Surfaces. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 534-539. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2070205110050059>
11. Friedrich J. *The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces: Advanced Techniques for Surface Design*. Weinheim: Wiley. 2012. Chapter 2. Interaction between Plasma and Polymers, pp. 15-25. <https://doi.org/10.1002/9783527648009.ch2>
12. Martín M. A. *Remote Plasma Assisted Fabrication of Functional Organic and Hybrid Thin Films and Supported Nanostructures*. A thesis submitted for the degree of PhD. Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (US-CSIC). Universidad de Sevilla, 2015. 345 p.
13. Berlin A. A., Basin V. E. *Osnovy adgezii polimerov* [Fundamentals of Polymer Adhesion]. Moscow: Khimiya Publ., 1969. 320 p.
14. *Khimicheskaya entsiklopediya*. Pod red. N.S. Zefirova. V pyati tomakh. T. 4. [Chemical Encyclopedia. Ed. by N.S. Zefirov. In five volumes. Vol. 4]. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya Publ., 1995. 641 p.
15. *Entsiklopediya polimerov*. Pod red. V.A. Kabanova. V trekh tomakh. T. 2: L – Polinoznye volokna [Encyclopedia of Polymers. Ed. V.A. Kabanova. In three volumes. Vol. 2: L – Polynose fibers]. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1974. 514 p.
16. Lyakhovich A. M., Shushkov A. A., Lyalina N. V., Dityat'ev A. V. Prochnostnye svoystva nanorazmernykh polimernykh plenok, poluchennykh v nizkotemperaturnoj plazme benzola [Mechanical Properties of Nanodimensional Polymeric Films, Deposit From Benzene in Low-Temperature Plasma]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2010, vol. 12, no. 2, pp. 243-247. (In Russian).

Поступила 22.11.2021; принята к опубликованию 01.12.2021
Received 22 November 2021; accepted 01 December 2021

Шаков Анатолий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: toluol@yahoo.com

Anatoly A. Shakov, Cand. Sci.(Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Ломаева Светлана Федоровна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Svetlana F. Lomayeva, Dr. Sci.(Phys.-Math.), Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Поздеев Вячеслав Алексеевич, студент 4 курса УдГУ; лаборант, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Vjacheslav A. Pozdeev, student of Udsu, lab assistant, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Шушков Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН; доцент кафедры НУМТ ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация

Andrey A. Shushkov, Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS; Assistant professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН; профессор кафедры НУМТ ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация

Alexander V. Vakhrushev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS; Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation