

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.186

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106



ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОПОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ И ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Теплоухов А.А.¹, Полещенко К.Н.², Несов С.Н.¹, Семенюк Н.А.¹, Серопян Г.М.³, Сычев С.А.³, Ласица А.М.¹, Чуранкин В.Г.¹

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

³Омский государственный университет имени Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Усовершенствование современной техники выдвигает новые и более высокие требования к физико-механическим свойствам полимерных композиционных материалов, широко применяемых в узлах трибосопряжения. Это обуславливает актуальность задачи создания новых полимерных топокомпозитов триботехнического назначения с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Однако получение металлизированных покрытий на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) требует изучения физических явлений и процессов, сопровождающих то или иное энергетическое воздействие на полимерный материал. Основной задачей является исследование особенностей структурно-фазовых изменений поверхности и приповерхностного слоев, а также изучение особенностей эволюции морфологии и состава наноструктурированного топокомпозита на основе ПТФЭ при ионно-плазменном и лазерном воздействиях. **Используемые методы.** Для решения данной задачи применяется поверхностная модификация полимерной матрицы молибденом методом магнетронного распыления с последующим лазерным воздействием. **Новизна.** Впервые исследованы структурно-фазовые и морфологические аспекты при формировании топокомпозитов на основе ПТФЭ при различных условиях лазерного воздействия. Установлено, что в результате лазерного воздействия на пленку молибдена наблюдается изменение соотношения концентраций элементного состава поверхности, что приводит к уменьшению отношения атомарных концентраций молибдена к кислороду. Анализ химического состава пленки молибдена показал наличие металлического молибдена, а также наличие оксида молибдена (II) и оксида молибдена (III). Выявлено, что при увеличении плотности энергии лазерного воздействия растет доля высшего оксида молибдена MoO_3 на поверхности. **Результат.** Проведены исследования эволюции морфологии поверхности и изменения структурно-фазового состояния приповерхностных слоев. Установлены эффекты лазерного воздействия, связанные с образованием частиц кристаллического строения. **Практическая значимость.** Наличие оксидов молибдена в составе покрытия является положительным фактором, способствующим повышению антифрикционных свойств и работоспособности металлополимерной трибосистемы.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, морфология, структурно-фазовое состояние, наноструктурные топокомпозиты, ионно-плазменное напыление, лазерная имплантация.

© Теплоухов А.А., Полещенко К.Н., Несов С.Н., Семенюк Н.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Ласица А.М., Чуранкин В.Г., 2022

Для цитирования

Особенности структурно-фазовых и морфологических изменений поверхности топокомпозита на основе политетрафторэтилена при ионно-плазменном и лазерном воздействии / Теплоухов А.А., Полещенко К.Н., Несов С.Н., Семенюк Н.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Ласица А.М., Чуранкин В.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

FEATURES OF STRUCTURAL PHASE AND MORPHOLOGICAL CHANGES OF THE SURFACE OF PTFE-BASED TOPOCOMPOSITES EXPOSED TO ION-PLASMA AND LASER IMPACT

Teploukhov A.A.¹, Poleshchenko K.N.², Nesov S.N.¹, Semenyuk N.A.¹, Seropyan G.M.³, Sychev S.A.³, Lasitsa A.M.¹, Churankin V.G.¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

³Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of modern technologies sets new and higher requirements for physical and mechanical properties of polymer composite materials that are widely used in the nodes of tribosystems. This determines relevance of the task of creating new tribotechnical polymer topocomposites with high physical, mechanical and tribotechnical properties. However, the production of metallized coatings on the surface of polytetrafluoroethylene requires the study of physical phenomena and processes, accompanying the energy effect on the polymer material. The main aim is to study the features of structural phase transformations of the surface and near-surface layers, as well as the evolution of morphology and the composition of nanostructured PTFE-based topocomposites under ion-plasma and laser treatment. **Methods Applied.** To solve this problem, a molybdenum layer was deposited on the polymer surface by magnetron sputtering followed by laser treatment. **Originality.** Structural phase and morphological aspects were originally studied in the formation of topocomposites based on polytetrafluoroethylene under various conditions of laser exposure. It is established that laser exposure on the molybdenum film results in a change in the ratio of concentrations of the surface elemental composition, entailing a lower ratio of the number of molybdenum and oxygen atoms. The analysis of the chemical composition of the molybdenum film showed the presence of metallic molybdenum, molybdenum (II) oxide and molybdenum (III) oxide. It has been found that with an increase in the energy density of laser radiation, the fraction of higher molybdenum oxide MoO_3 on the surface increases. **Result.** The evolution of surface morphology and changes in the structural phase state of near-surface layers were studied. The effects of laser exposure associated with the formation of crystalline particles were established. **Practical Relevance.** The formation of molybdenum oxides in the coating composition is a positive factor that improves the antifriction properties and working capacity of the metal-polymer tribosystems.

Keywords: polytetrafluoroethylene, morphology, structural phase state, nanostructured topocomposites, ion-plasma sputtering, laser implantation.

For citation

Teploukhov A.A., Poleshchenko K.N., Nesov S.N., Semenyuk N.A., Seropyan G.M., Sychev S.A., Lasitsa A.M., Churankin V.G. Features of Structural Phase and Morphological Changes of the Surface of PTFE-Based Topocomposites Exposed to Ion-Plasma and Laser Impact. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106>

Введение

Актуальность работы обусловлена созданием новых материалов для конструктивных элементов трибосистем, испытывающих трение и воздействие экстремальных температур, в частности многофункциональных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Проведённый анализ перспективных разработок в области создания новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена показал, что основные усилия исследователей и разработчиков направлены на решение задач повышения их износостойкости

путём объемной модификации [1, 2]. Авторами работы [3] показано, что использование модификаторов позволяет не только улучшить физико-химические свойства ПКМ, но и повысить долговечность трибосопряжений.

В то же время возможности совершенствования ПТФЭ в направлении решения задач инженерии поверхности мало изучены. Как показывает анализ полученных данных, работы в этом направлении ведутся весьма успешно [4-8]. Для указанных задач используются, в основном, методы поверхностного ионнолучевого и электронно-лучевого модифицирования, приводящие к тем или иным структур-

но-фазовым изменениям приповерхностных слоёв ПТФЭ [4, 6].

При этом, как показывают результаты работы [9], многообещающим является конструирование на основе ПТФЭ нанокомпозитных и градиентных материалов, а также наноструктурных топокомпозитов, в том числе с использованием ионно-плазменных покрытий. Ионно-плазменное напыление молибдена на поверхность ПТФЭ и дальнейшее формирование оксидных фаз молибдена позволит улучшить антифрикционные свойства металлополимерной трибопары [10]. Вместе с тем следует отметить, что получение металлизированных покрытий на ПТФЭ является нетривиальной технологической задачей, требующей изучения физических явлений и процессов, сопровождающих то или иное энергетическое воздействие на полимерный материал.

Целью работы является исследование особенностей структурно-фазовых изменений поверхностного и приповерхностного слоёв, а также изучение особенностей эволюции морфологии и состава наноструктурированного топокомпозита на основе ПТФЭ при ионно-плазменном и лазерном воздействиях.

Методы и материалы

Исследуемые образцы были получены из высокомолекулярного порошка ПТФЭ по методике, описанной в работе [5]. На поверхность ПТФЭ методом магнетронного напыления в среде аргона наносилась пленка молибдена на установке ADVAVAS VSM200. Перед магнетронным напылением методом лазерной абляции на поверхности образцов из ПТФЭ формировались наноразмерные кластеры Cu. После лазерной абляции дополнительно проводилась активация поверхности ПТФЭ ионами аргона в течение 10 мин. Далее наносилось молибденовое покрытие в среде аргона. Время формирования покрытия составляло 120 мин. Температура подложки составляла 50°C. Затем на образцы ПТФЭ с покрытием с помощью твердотельного импульсного лазера с частотой 0,282 ГГц, длительностью импульса 16 нс осуществлялось лазерное воздействие, плотность энергии которого изменялась дискретно в диапазоне $Q = 0,18\text{--}0,72 \text{ Дж/см}^2$. Указанная последовательность обработки проводилась, с одной стороны, для обеспечения улучшения взаимодействия покрытия с основой, с другой – для изучения возможностей инициирования процессов морфологических изменений

покрытия, и возможностей изменения химического состава за счёт формирования новых фаз.

В результате были получены пять образцов (табл. 1).

Таблица 1. Исследуемые образцы

Table 1. Test samples

Номер образца	Образец	$Q, \text{Дж/см}^2$
1		-
2	ПТФЭ–100 мас. % + лазерная	0,18
3	абляция + Mo (пленка) + лазерное	0,36
4	воздействие	0,54
5		0,72

Для определения элементного состава и изучения влияния модификаторов на структуру поверхностного слоя модифицированной полимерной матрицы ПТФЭ использовался метод рентгеноспектрального анализа при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JCM-5700 при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток пучка – 1,0 нА.

Анализ структурно-фазового состояния поверхности образцов проводился с использованием метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием установки Surface Science Center (Riber). Спектры РФЭС измерялись в условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-9}$ Торр). Мощность источника составляла 240 Вт. Разрешение по энергии при регистрации спектров остевых линий составляло $\sim 0,2$ эВ, обзорных спектров $\sim 1,2$ эВ. Оценочная глубина сканирования образцов методом РФЭС составила 1–5 нм. Исследовались как исходная поверхность образцов, так и их поверхность после ионного травления. Ионное травление поверхности проводилось при энергии ионов аргона 3 кэВ, глубина травления составила порядка 10 нм.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведено электронно-микроскопическое изображение поверхности покрытия, нанесённого на ПТФЭ. Видно, что после нанесения пленки молибдена на поверхность ПТФЭ структура модифицированной поверхности характеризуется наличием разупорядоченно-ориентированных полос. Кроме того, на поверхности наблюдаются трещины и складки, что согласуется с результатами работы [4].



Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца №1
Fig. 1. Electron microscopic image of the surface of sample No. 1

В табл. 2 приведены данные о химическом составе образца №1 после нанесения покрытия, полученные методом растровой электронной микроскопии.

Таблица 2. Состав поверхностного слоя образца №1
Table 2. Composition of the surface layer of sample No. 1

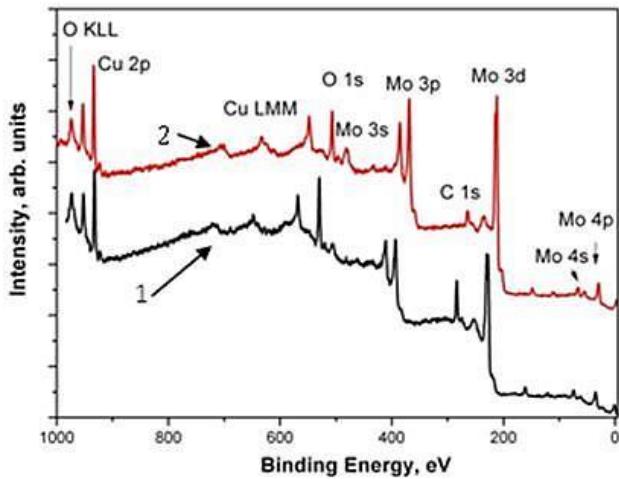
Концентрация, ат. %			[Mo]/[O]
[Mo]	[O]	[C]	
49,1	28,1	22,8	1,75

По данным табл. 2 видно, что после магнетронного напыления в поверхностном слое присутствуют Mo, O и C. Отношение молибдена к кислороду составляет 1,75.

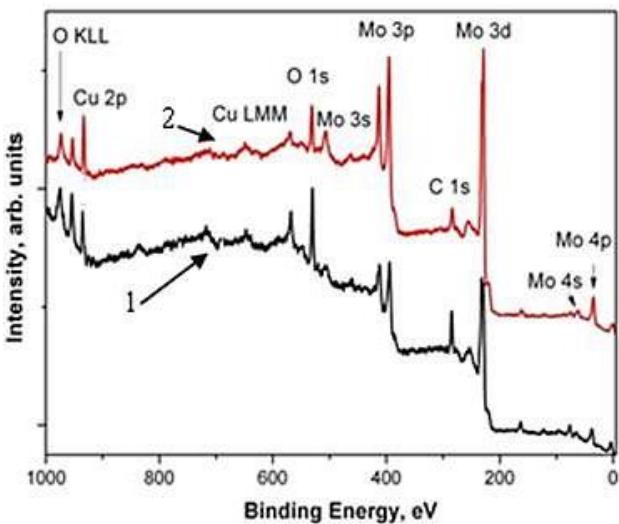
На рис. 2 представлены обзорные РФЭС-спектры для образцов №2 и 3 как исходных поверхностей, так и поверхностей образцов после ионного травления. В спектрах присутствуют линии молибдена, меди, кислорода и углерода. Появление меди на поверхности может быть обусловлено сегрегационными явлениями, проходящими вследствие лазерного воздействия.

Из обзорных спектров видно, что после ионного травления снижается интенсивность линий углерода и кислорода, а интенсивность линий молибдена, напротив, увеличивается. Это указывает на то, что углерод на поверхности присутствует в виде поверхностных загрязнений и его содержание снижается при увеличении расстояния от поверхности. Снижение количества кислорода после ионного травления указывает также на присутствие естественного оксида молиб-

дена на поверхности. Однако даже после травления линия кислорода достаточно интенсивна. Это указывает на то, что даже в объеме образца молибден присутствует не только в металлическом состоянии, но и в виде оксида. Появление меди на поверхности после лазерного воздействия может быть обусловлено сегрегационными явлениями.



а



б

Рис. 2. Обзорный РФЭС-спектр: а – для образца №2; б – для образца №3; 1 – исходная поверхность; 2 – поверхность после ионного травления
Fig. 2. Overview XPS spectrum: a is for sample No. 2; б is for sample No. 3; 1 is an original surface; 2 is a surface after ion etching

В табл. 3 представлены результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии поверхности образцов. При сравнении данных можно увидеть, что состав поверхностей образцов №2 и 3 достаточно близок. Как для образца №2, так и для образца №3 после ионного травления наблюдается

увеличение в составе поверхностного слоя концентрации молибдена и меди, при этом концентрации углерода и кислорода уменьшаются. Однако в образце №2 наблюдается более высокое содержание кислорода по сравнению с образцом №3.

Таблица 3. Химический состав поверхностного слоя, ат.% данных РФЭС

Table 3. Chemical composition of the surface layer, at.% according to XPES

Номер образца	Исследуемая поверхность	Концентрация, ат.%			
		[Mo]	[Cu]	[C]	[O]
2	Исходная поверхность	31,5	6,7	32,9	28,9
	Поверхность после травления	46,2	9,4	19,5	24,9
3	Исходная поверхность	32,7	6,3	34,3	26,7
	Поверхность после травления	48,4	9,8	19,3	22,5

Для более детального анализа были использованы спектры линии молибдена 3d (рис. 3). Максимум линии Mo 3d5/2 расположен на энергии связи ~ 228 эВ, что соответствует металлическому молибдену. Однако в спектре, измеренном до травления, присутствует высокоэнергетический компонент на энергии связи ~ 235 эВ, наличие которого указывает на присутствие оксида MoO_3 . После ионного травления данного компонента не наблюдается (линия 2 на рис. 3, а). Наличие кислорода в обзорном спектре образца после травления (см. рис. 2) указывает на наличие оксида молибдена, поэтому было проведено разложение спектра молибдена после травления (рис. 3, б) [9].

Проведенное исследование показывает, что в спектре кроме компонентов, отвечающих металлическому молибдену 228,1–228,3 эВ [11], присутствуют также компоненты оксида молибдена. Положение их максимумов свидетельствует, что это оксид MoO_2 [9]. Интенсивность компонентов пропорциональна их концентрации. Соответственно, в объеме преобладает металлический молибден, на долю окисленных атомов молибдена приходится не более 15%.

Сравнение РФЭС-спектров Mo 3d (см. рис. 3) показывает, что химическое состояние молибдена в образце №2 также аналогично состоянию молибдена в образце №3. То есть на поверхности присутствует оксид MoO_3 , а после ионного травления присутствует металлический молибден и некоторая доля молибдена в составе низших оксидов MoO_2 .

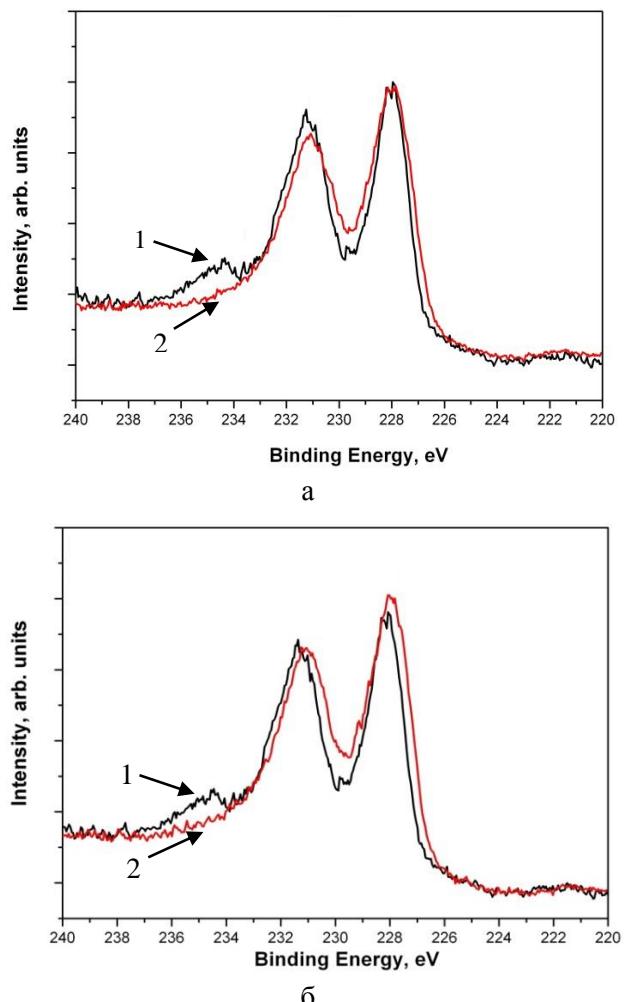


Рис. 3. РФЭС-спектры Mo 3d-образца №2:
а – для образца №2; б – для образца №3;
1 – исходная поверхность; 2 – поверхность
после ионного травления

Fig. 3. XPES spectra of Mo of 3d sample No. 2:
a is for sample No. 2; b is for sample No. 3;
1 is an original surface; 2 is a surface
after ion etching

На рис. 4 представлены микрофотографии образцов №2 и 3, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Из рисунка видно, что лазерное воздействие приводит к формированию на поверхности пленки молибдена плотноупакованных элементов размером порядка от 1 до 3 мкм, которые можно идентифицировать как участки с отдельными частицами оксида молибдена или их агломератами.

На рис. 5 представлены обзорные РФЭС-спектры образца №5. В спектре присутствуют линии молибдена, меди, кислорода, углерода. По составу и химическому состоянию образец №4 практически идентичен образцу №5.

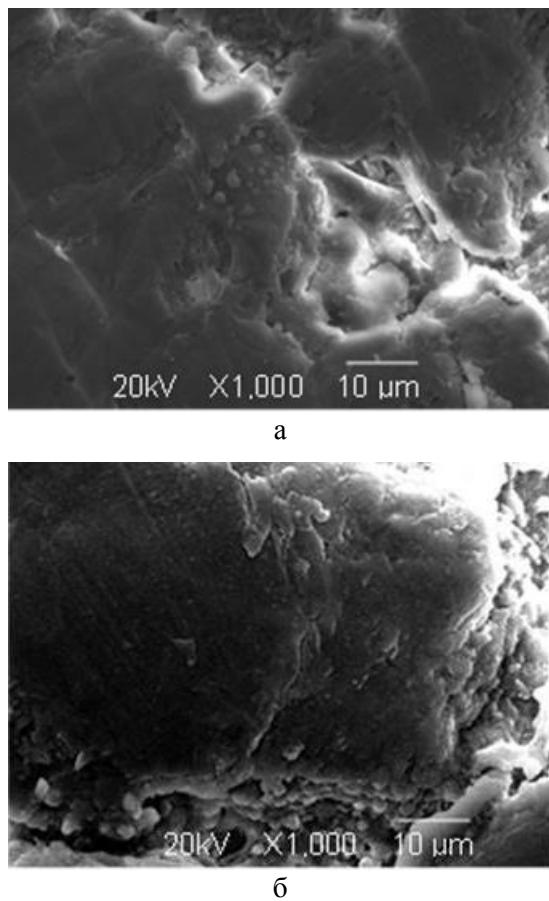


Рис. 4. Микрофотографии образцов:
а – №2; б – №3

Fig. 4. Micrographs of samples:
a is No. 2; b is No. 3

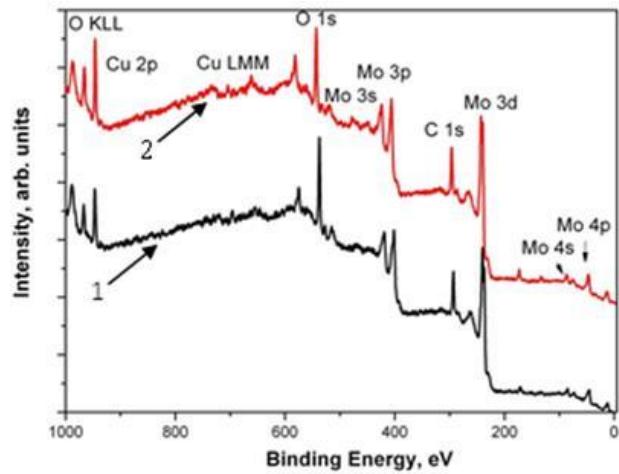


Рис. 5. Обзорные РФЭС-спектры образца № 5:
1 – исходная поверхность; 2 – поверхность
после ионного травления

Fig. 5. Overview XPS spectra of sample No. 5: 1 is an original surface; 2 is a surface after ion etching

В табл. 4 представлены результаты количественного анализа поверхности образца №4.

Таблица 4. Химический состав поверхностного слоя,
ат.% данным РФЭС

Table 4. Chemical composition of the surface layer,
at.% according to XPS

Номер образца	Исследуемая поверхность	Концентрация, ат.%			
		[Mo]	[Cu]	[C]	[O]
4	Исходная поверхность	30,6	4,4	34,1	30,9
	Поверхность после травления	32,3	6,2	34,9	26,6
5	Исходная поверхность	30,0	4,6	33,7	31,7
	Поверхность после травления	32,0	6,3	34,2	27,5

Как видно, для данных образцов не наблюдается значительного изменения состава после ионного травления. Однако по сравнению с образцами №2 и 3 наблюдается уменьшение концентраций молибдена и меди как в приповерхностном слое исходных образцов, так и после ионного травления. Наряду с этим наблюдается рост концентраций углерода и кислорода. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что увеличение плотности энергии лазерного воздействия до значений 0,54 и 0,72 Дж/см², приводящее к формированию оксидов молибдена на поверхности, происходит вследствие процессов атомного перемешивания.

На рис. 6 представлены спектры линии молибдена 3d, измеренные на исходной поверхности образца №5, а также после ионного травления.

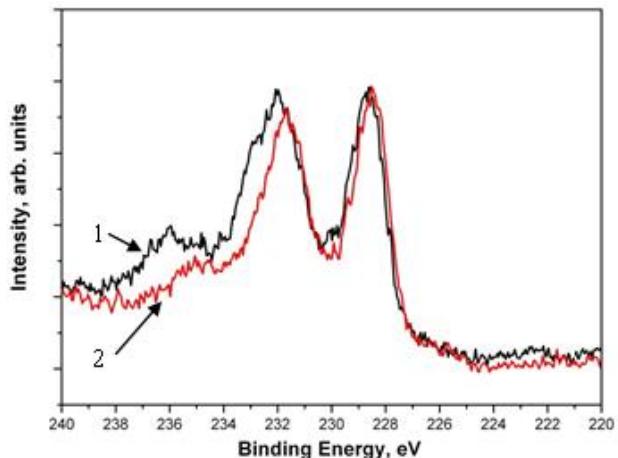


Рис. 6. РФЭС-спектры Mo 3d-образца №5:

1 – исходная поверхность;
2 – поверхность после ионного травления

Fig. 6. XPS spectra of Mo of 3d sample No. 5:
1 is an original surface;
2 is a surface after ion etching

Из **рис. 6** видно, что наблюдается увеличение количества высшего оксида молибдена MoO_3 , что соответствует значениям энергии в диапазоне 232,5–233,5 эВ и согласуется с данными, приведенными в работе [11]. При сравнении спектров образца №5 (см. **рис. 5**) с образцами №2 (см. **рис. 3, а**) и №3 (см. **рис. 3, б**) видно, что доля высшего оксида для образца №5 заметно выше.

На **рис. 7** представлены микрофотографии образцов №4 и 5, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

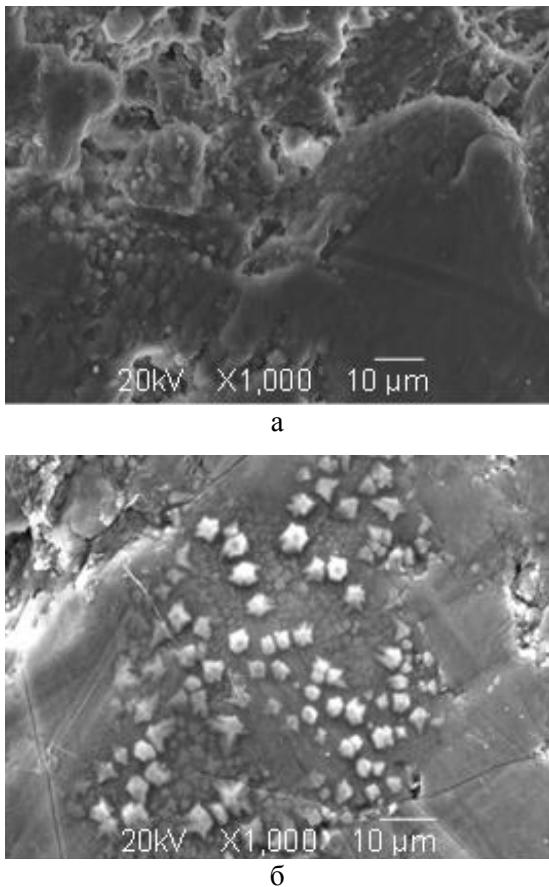


Рис. 7. Микрофотографии образцов: а – образец №4; б – образец №5

Fig. 7. Micrographs of samples: a is sample No. 4; b is sample No. 5

Полученные данные показывают, что поверхность образца №5 характеризуется специфической морфологией, отличающейся наличием мелкокристаллических частиц оксида молибдена, а также присутствием элементов меди, углерода и кислорода. Аналогичный результат был получен и для образца №4. С увеличением плотности энергии лазерного воздействия до 0,72 Дж/см² наблюдается рост частиц оксида молибдена MoO_3 кристаллического строения до размеров 7–8 мкм.

Заключение

В результате проведённых исследований установлен ряд структурных, фазовых и морфологических изменений:

1. Установлено, что при поверхностной модификации поверхности ПТФЭ молибденом структура поверхности образца характеризуется наличием разупорядоченно-ориентированных полос, а также складок и трещин. Отношение атомарных концентраций молибдена к кислороду составляет 1,75.

2. В результате лазерного воздействия на пленку молибдена наблюдается изменение соотношения концентраций элементного состава поверхности, что приводит к уменьшению отношения атомарных концентраций молибдена к кислороду. Анализ химического состава пленки молибдена показал наличие металлического молибдена, а также его оксидов MoO_2 и MoO_3 .

3. Данные РФЭС позволяют говорить об окислении молибдена в приповерхностном слое и возможной диффузии свободного углерода с поверхности в приповерхностную область при лазерном воздействии.

4. Выявлено, что лазерное воздействие также приводит к появлению частиц оксида молибдена (III) кристаллического строения, а с увеличением плотности энергии лазерного воздействия с 0,18 до 0,72 Дж/см² наблюдается рост данных частиц на 60%.

Список литературы

- Новый наноматериал: металлоксодержащий политетрафторэтилен / М.С. Коробов, Г.Ю. Юрков, А.В. Козинкин и др. // Неорганические материалы. 2004. Т. 40, № 1. С. 31–40.
- Механохимические методы получения композитных материалов металл-керамика-политетрафторэтилен / О.И. Ломовский, А.А. Политов, Д.В. Дудина и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2004. №12. С. 619–626.
- Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В. Разработка и исследование полимерного нанокомпозита для металлополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. Т. 133 (3). С. 64–66.
- Лапуть О.А., Курзина И.А., Пухова И.В. Модификация поверхности поливинилового спирта и политетрафторэтилена методом ионной имплантации // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов международной конференции, 9–11 июня 2016 г. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. С. 250–256.
- Исследование структурообразования в политетрафторэтилене, наполненном алюминием, после

- взрывного прессования / Н.А. Адаменко, А.В. Казуров, Д.В. Савин и др. // Материаловедение. 2021. №4. С. 26–32.
6. Пухова И.В. Модификация поверхности ПТФЭ ионно-лучевым воздействием // Сборник докладов XIV Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (ЭДС – 2016) 12–17 сентября 2016 г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. С.141.
7. Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene / I.V. Vasenina [et. al] // Surface and coatings technology. 2018. V. 334. Pp. 134–141.
8. Особенности структурообразования наноразмерных покрытий политетрафторэтилена при осаждении из газовой фазы / А.А. Рогачев, А.П. Лучников, М.А. Ярмоленко и др. // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2015. №1. С. 29–40.
9. Получение слоисто-армированного нанокомпозита на основе политетрафторэтилена методами лазерной абляции и ионно-плазменного модифицирования / Mashkov Ю.К., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н. и др.// Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, №12(192). С. 531–538.
10. Бондарев А.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Штанский Д.В. Твердые износостойкие покрытия TiAlSiCN/MoSeC с низким коэффициентом трения при комнатной и повышенных температурах // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 4. С. 60–67.
11. Oshikawa K., Nagai M., Omi S. Characterization of Molybdenum Carbides for Methane Reforming by TPR, XRD, and XPS // J. Phys. Chem. B. 2001. Vol. 105. Pp. 9124–9131.

References

1. Korobov M.S., Yurkov G.Yu., Kozinkin A.V. et al. A novel nanomaterial: metal-containing polytetrafluoroethylene. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2004, no. 40(1), pp. 31–40. (In Russ.)
2. Lomovsky O.I., Politov A.A., Dudina D.V. et al. Mechanochemical methods for producing metal-ceramics-polytetrafluoroethylene composite materials. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2004, no. 12, pp. 619–626. (In Russ.)
3. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Chemisenko O.V. Development and research of a polymer nanocomposite for metal polymer friction units. *Omsky nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2014, vol. 133 (3), pp. 64–66. (In Russ.)
4. Laput O.A., Kurzina I.A., Pukhova I.V. Modification of the surface of polyvinyl alcohol and polytetrafluoroethylene by ion implantation. *Materialy i tekhnologii novykh pokoleniy v sovremenном materialovedenii: sbornik trudov mezhunarodnoy konferentsii*. [Materials and technologies of new generations in modern materials science: Proceedings of the International Conference, June 9–11, 2016]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University], 2016, pp. 250–256. (In Russ.)
5. Adamenko N.A., Kazurov A.V., Savin D.V. et al. Research on the structure formation in polytetrafluoroethylene filled with aluminum after explosive pressing. *Materialovedenie* [Materials Science], 2021, no 4, pp. 26–32. (In Russ.)
6. Pukhova I.V. Modification of the PTFE surface by ion-beam exposure. *Sbornik dokladov XIV Mezhunarodnoy shkoly-seminara «Evolutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh» (EDS – 2016)* [Collection of reports of the 14th International School-Seminar "Evolution of defective structures in condensed media" (EDS–2016), September 12–17, 2016. Barnaul: Publishing House of Altai State Technical University], 2016, p. 141. (In Russ.)
7. Vasenina I.V. et. al Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 334, pp. 134–141.
8. Rogachev A.A., Luchnikov A.P., Yarmolenko M.A. et al. Features of the structure formation of nanoscale polytetrafluoroethylene coatings during deposition from the gas phase. *Nanomaterialy i nanostruktury - XXI vek* [Nanomaterials and Nanostructures – the 21st Century], 2015, no. 1, pp. 29–40. (In Russ.)
9. Mashkov Yu.K., Poleshchenko K.N., Eremin E.N. et al. Producing a layered reinforced polytetrafluoroethylene-based nanocomposite by laser ablation and ion-plasma modification. *Uprchnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 12(192), pp. 531–538. (In Russ.)
10. Bondarev A.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Shtansky D.V. Solid wear-resistant coatings TiAlSiCN/MoSeC with a low coefficient of friction at room and elevated temperatures. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2013, no. 4, pp. 60–67. (In Russ.)
11. Oshikawa K., Nagai M., Omi S. Characterization of molybdenum carbides for methane reforming by TPR, XRD, and XPS. *J. Phys. Chem. B*, 2001, vol. 105, pp. 9124–9131.

Поступила 04.04.2022; принята к публикации 18.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 04/04/2022; revised 18/04/2022; published 28/06/2022

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, главный энергетик, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Несов Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Серопян Геннадий Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Сычев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Ласица Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Чуранкин Вячеслав Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor, Chief Power Engineer, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Konstantin N. Poleschenko – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Sergey N. Nesov – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Gennady M. Seropyan – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Sergey A. Sychev – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Aleksandr M. Lasitsa – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Vyacheslav G. Churankin – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340