

УДК 541.64:539(2+3)

О ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРЫ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА ПОЛИМЕР МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ¹

© 2011 г. Д. А. Панчук*, С. Л. Баженов**, А. В. Большакова*, Л. М. Ярышева*,
А. Л. Волынский*, Н. Ф. Бакеев**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.
Химический факультет
119992 Москва, Ленинские горы

**Учреждение Российской академии наук
Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70

Поступила в редакцию 08.04.2010 г.

Принята в печать 18.10.2010 г.

Проведен анализ данных по оценке прочности покрытий на основе благородных металлов (Pt, Au), нанесенных на пленки ПЭТФ методом ионно-плазменного напыления. Обнаружено, что параллельно с осаждением металла при указанном способе его нанесения происходит модификация поверхностного слоя полимера в результате взаимодействия с плазмой. Это приводит к возникновению сложной, трехслойной структуры вблизи поверхности полимера. Предложен новый метод оценки прочности покрытий, нанесенных на полимерные подложки. Метод позволяет анализировать деформационно-прочностные свойства трехслойных систем, которые возникают при нанесении нанометровых слоев благородных металлов на полимерные пленки методом ионно-плазменного напыления. Полученные соотношения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Металлизированные полимерные пленки широко используются от упаковки продуктов до микроэлектроники и биосенсоров [1–3]. На структуру металлических покрытий влияют зарожение, рост и адгезия металлических пленок к полимерам. Металлические слои могут быть получены на поверхности полимера ионно-плазменным, вакуумным напылением или электрохимической процедурой [4].

Способ нанесения металлических слоев на полимеры может оказывать существенное влияние на их структуру, а следовательно, на их свойства. В частности, в работе [5] было показано, что нанесение золотого покрытия на поверхность ПЭТФ методом термического испарения металла в вакууме или ионно-плазменным напылением приводит к получению систем, различающихся по структуре металлических слоев, а также характеру их взаимодействия с полимером-подложкой. В недавних работах [6, 7] было установлено, что при ионно-плазменном напылении благород-

ных металлов на полимеры происходит не только конденсация металла на поверхности, но и взаимодействие плазмы с поверхностью полимера. В результате этого образуется сложная система полимер–металл, в которой кроме полимера-подложки и слоя металла присутствует и модифицированный в холодной плазме поверхностный слой полимера.

Цель настоящей работы – попытка оценки вклада каждого из компонентов такой сложной системы в прочностные свойства слоев, получаемых при нанесении благородных металлов ионно-плазменным методом на поверхность ПЭТФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали промышленные пленки аморфного неориентированного ПЭТФ толщиной 100 мкм. Из пленок вырубали образцы в виде двусторонних лопаток с размером рабочей части 6 × 22 мм. На указанные образцы наносили слои золота и платины различной толщины методом ионно-плазменного напыления на установке “Eiko IB-3”. Для определения толщины покрытия использовали следующую методику. На стеклянную подложку в аналогичных условиях нанесли тонкую пленку исследуемого материала, затем с помощью тонкой деревянной палочки,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта государственной поддержки Ведущих научных школ (НШ-4371.2010.3) и Госконтракта № 02.740.11.0143.

которая не нарушала целостность подложки, царапали покрытие и измеряли высоту царапины с помощью атомно-силового микроскопа. В результате этих измерений строили калибровочные графики зависимости толщины покрытия от времени напыления металла на стеклянную подложку. Толщину покрытия регулировали временем напыления.

Образцы ПЭТФ с металлическим покрытием растягивали с помощью динамометра “Instron-1122” с постоянной скоростью 10 мм/мин при 20°C. Микроскопические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе “Hitachi S-520” и атомно-силовом микроскопе “Nanoscope-IIIa” (“Digital Instruments”, Санта-Барбара, США) в контактном режиме сканирования.

Прочность нанесенных покрытий оценивали с помощью соотношения

$$\sigma^* = L\sigma_0/3h, \quad (1)$$

где h – толщина покрытия, σ^* – предел его прочности, σ_0 – напряжение в подложке. Подробности метода расчетов изложены в работах [8–10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена зависимость прочности платинового и золотого покрытий, нанесенных на пленку-подложку ПЭТФ ионно-плазменным методом и вычисленных с помощью соотношения (1), от их толщины [9, 10]. Хорошо видно, что прочность обоих металлов практически не зависит от их толщины в интервале от 30 до ~15 нм. Значение прочности обоих металлов в указанном диапазоне толщины колеблется от 180 до 220 МПа для золота и от 250 до 300 МПа для платины. Эти величины количественно соответствуют известным значениям прочности для блочных металлов (176–250 МПа для золота и 240–350 МПа для платины) [11]. В то же время из рис. 1 следует, что начиная с толщины ~15 нм прочность обоих металлов начинает стремительно увеличиваться с уменьшением толщины нанесенного покрытия. Значение прочности для платины достигает 1800 МПа, для золота – 3700 МПа. Как видно, прочность металла в нанослоях по крайней мере на порядок превосходит прочность блочного материала. Важно отметить, что сильнейшее влияние на значения прочности покрытий оказывает температура деформирования пленки-подложки. Как видно на рис. 1, это влияние имеет место только в области малых значений толщины покрытий (до ~10 нм). При большей толщине прочность покрытия перестает зависеть от температуры деформирования, и его значения стремятся к значениям прочности металлов в блоке. Очевидно, что прочность блочных благородных металлов, имеющих весьма высокие тем-

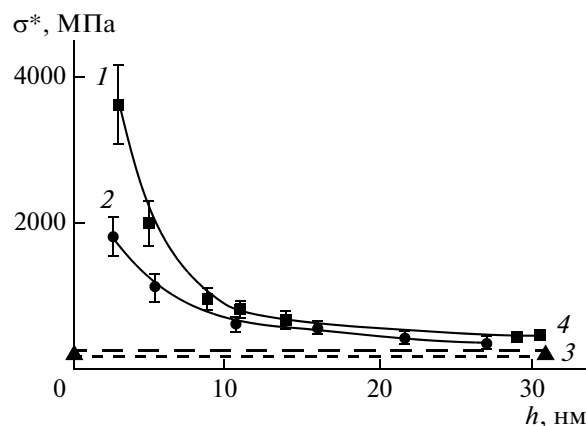


Рис. 1. Зависимость прочности платинового (1) и золотого (2) покрытий, нанесенных на пленку-подложку ПЭТФ ионно-плазменным методом, от их толщины, расчет по формуле (1) при 20°C [10]; 3, 4 – прочность блочных платины и золота [11].

пературы плавления ($T_{пл}(Au) = 1063^\circ C$, $T_{пл}(Pt) = 1769^\circ C$), не может изменяться так сильно в столь малом температурном интервале. Возникает вопрос о том, насколько реальными являются столь высокие значения прочности металлических покрытий в области их малых значений толщины. Дело в том, что формула (1), использованная для оценки прочности покрытий в данной работе, дает адекватное значение прочности только для двуслойной системы полимер–металлическое покрытие, которая была названа в работах [12–15] твердое покрытие на податливом основании. В этом случае главным параметром, позволяющим оценить прочность, являются размеры фрагментов разрушения покрытия L , возникающие при растяжении полимера-подложки.

В то же время, как показывают многочисленные исследования [16–18], сплошное покрытие на полимерных подложках образуется далеко не сразу при его ионно-плазменном или термическом напылении. Как правило, первые порции напыляемого металла конденсируются на поверхности полимера в виде отдельных островков. Другими словами, на первых этапах напыления металла на поверхности полимера образуется система дискретных нанокластеров, размер которых и их распределение по размерам, а также их взаимное расположение на подложке зависят от скорости напыления, температуры подложки, реакционной способности металлических атомов и т.д. В этой связи само понятие толщины покрытия при малых временах и скоростях напыления металла на поверхность полимера становится неопределенным. В таких случаях обычно говорят об эффективной или номинальной толщине покрытия [19, 20], поскольку по существу сплошного единого покрытия на поверхности полимера на

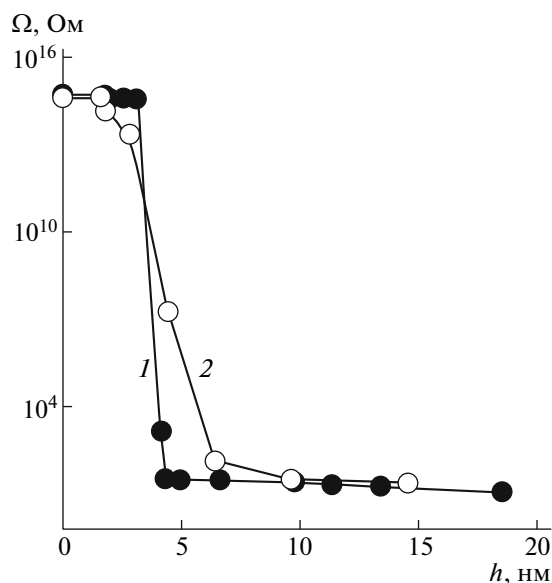


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления Ω тонких слоев золота от их толщины h . Металл нанесен на полимер методом ионно-плазменного (1) и термического (2) напыления [5].

начальных этапах напыления металла не образуется. Данное обстоятельство вызывает очевидные затруднения при оценке механических свойств покрытий в области их малой толщины, поскольку значение толщины h входит в формулу (1).

Естественно, что такой механизм образования покрытий сильнейшим образом влияет на свойства системы полимер–металл в целом. На рис. 2 представлена зависимость поверхностного электрического сопротивления от толщины металлического (Au) покрытия [5], нанесенного ионно-плазменным и термическим напылением. Хорошо видно, что в обоих случаях электрическое сопротивление не зависит от толщины золотого покрытия до тех пор, пока его толщина составляет не менее $\sim 5\text{--}7$ нм. Дальнейшее понижение номинальной толщины покрытия приводит к резкому возрастанию сопротивления (более чем на 12 порядков). Очевидно, что столь резкое увеличение электрического сопротивления связано с нарушением сплошности металлического слоя, что нарушает перколяцию металлических кластеров на поверхности полимера и, как следствие, приводит к соответствующему падению электропроводности.

Итак, на первых этапах нанесения (напыления) благородных металлов на полимерную поверхность не возникает единого непрерывного покрытия, а наблюдается фрагментация поверхностного слоя полимера, что позволяет использовать формулу (1) для оценки его прочности. Возникает вопрос о том, что же фрагментируется на поверхности полимера в отсутствие единого ме-

таллического покрытия? Этот вопрос был подробно рассмотрен в работе [21]. Оказалось, что при ионно-плазменном нанесении покрытий из благородных металлов на полимеры одновременно с их осаждением происходит обработка поверхности полимера холодной плазмой. Хорошо известно, что при воздействии холодной плазмы на полимеры происходит химическая модификация их поверхности. Это явление подробно изучено и широко применяется на практике [22, 23]. Воздействие плазмы на поверхность полимера используют главным образом для модификации контактных свойств (смачивания, адгезии к тонким слоям металла, способности к склеиванию, регулирования адгезии применяемых при печати красителей и т.п.). В настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что при обработке полимеров плазмой на их поверхности возникают модифицированные нанослои, имеющие свой химический состав, а также особые физико-химические, электрические и другие свойства.

Очевидно, что и деформационно-прочностные свойства модифицированных с помощью плазменной обработки нанослоев полимеров должны отличаться от свойств немодифицированного, исходного полимера. Действительно, как было показано в работах [6, 7, 21], обработка полимеров в холодной плазме приводит к возникновению на их поверхности достаточно жесткого поверхностного слоя, что придает им свойства системы твердое покрытие на податливом основании. При последующей деформации полимера-подложки модифицированный плазмой слой фрагментируется, что открывает возможность оценки деформационно-прочностных свойств указанных слоев с помощью подхода, развитого в работах [8–10, 12–15].

В работах [6, 21] было показано, что фрагментация модифицированного плазмой слоя существенно отличается от изученных ранее процессов фрагментации металлических покрытий. В пределах разброса экспериментальных данных можно сказать, что размер фрагментов разрушения L практически не зависит от времени обработки ПЭТФ плазмой. Это означает, что образование химически модифицированного слоя происходит в первые моменты обработки полимера плазмой. Дальнейшая обработка не сопровождается заметным увеличением толщины модифицированного слоя, которая остается практически постоянной. В то же время полученный результат соответствует характеристике некоторых других поверхностных свойств полимера [24], согласно которым краевой угол смачивания и плотность поверхностного заряда изменяются только в первые несколько десятков секунд обработки полимера плазмой, после чего остаются постоянными. Важно отметить, что толщина возникающего при обработке плазмой модифицированного поверх-

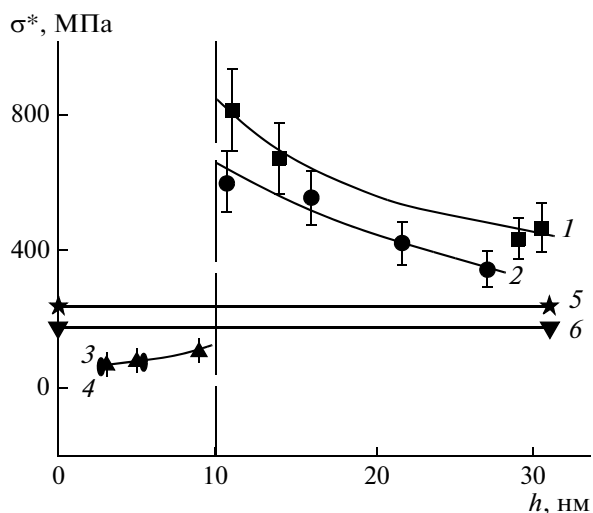


Рис. 3. Зависимость прочности σ^* золотого (1) и платинового (2) покрытий от толщины нанесенного покрытия при 20°C и $h > 10$ нм, расчет по формуле (1); до 10 нм – расчет по формуле (1) с учетом толщины плазменного слоя (80 нм) для золота (3) и для платины (4); 5, 6 – прочность блочных платины и золота.

ностного слоя (согласно микроскопическим данным [6, 21] и данным других методов исследования [25–27]) составляет ~ 50 – 150 нм. В частности, для ПЭТФ эта величина по разным оценкам близка к ~ 80 нм и практически не зависит от времени обработки полимера плазмой. Взяв за основу предположение о том, что толщина модифицированного слоя $h = 80$ нм, в работе [21] с помощью уравнения (1) была проведена оценка деформационно-прочностных свойств указанных слоев. Было показано, что для деформирования полимера подложки при 20°C прочность покрытия составляет ~ 33.3 МПа, а для деформирования при 90°C ~ 3.7 МПа. Как видно из представленных данных, в зависимости от температуры прочность модифицированного слоя полимера существенно изменяется. Несмотря на то, что полимер в этом слое, видимо, является сшитым [23], он остается чувствительным к переходу из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Таким образом, зависимость прочности металлических покрытий от их толщины, представленная на рис. 1, не отражает реальную физическую картину явления, что не позволяет в полной мере использовать приведенные данные для оценки деформационно-прочностных свойств металлических покрытий, нанесенных методом ионно-плазменного напыления на металлы. Эта зависимость может быть использована только при такой толщине покрытия, где заведомо возникает непрерывный металлический слой на поверхности полимера. Согласно результатам электронной микроскопии [28] и некоторых других методов исследования [5], сплошное металлическое по-

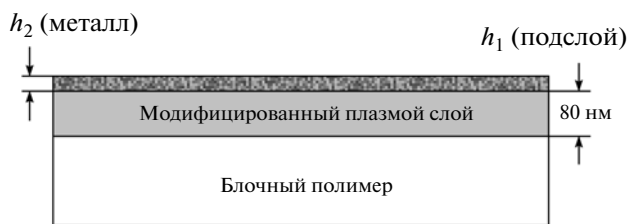


Рис. 4. Схематическое изображение полимерной пленки с нанесенным на ее поверхность слоем благородного металла методом ионно-плазменного напыления.

крытие возникает на поверхности полимера при их номинальной толщине более 7 – 10 нм.

В этой связи данные рис. 1 можно условно разделить на две части. Одна часть значений такой зависимости характеризует прочность металлических покрытий, что отвечает номинальной толщине 10 – 30 нм, где реализуется непрерывное металлическое покрытие [5, 28]. Другая часть представленных значений соответствует номинальной толщине менее 10 нм, т.е. по сути – это прочность модифицированного плазмой поверхностного слоя полимера. Как уже говорилось, толщина указанного слоя практически постоянна при всех временах обработки полимера плазмой и равна ~ 80 нм. Если на рис. 1 для значений толщины покрытия менее 10 нм подставить значение 80 нм, то зависимость будет выглядеть принципиально иначе (рис. 3). Данные, представленные на рис. 3, конечно, имеют условный характер, но отражают трехслойную структуру рассматриваемой системы. В то же время формула (1), лежащая в основе оценок прочности, как было отмечено выше, по своему физическому смыслу позволяет оценивать прочность только двуслойных систем твердое покрытие на податливом основании.

В этой связи возникает необходимость получения количественных соотношений для анализа деформационно-прочностных свойств трехслойных систем полимер–покрытие, которые реализуются при ионно-плазменном напылении благородных металлов на полимеры. Попытаемся создать количественный подход для анализа такого рода трехслойных систем металл–модифицированный плазмой поверхностный слой полимера–полимер–подложка. Схематически строение такой системы представлено на рис. 4.

Одной из главных особенностей рассматриваемой системы является предположение о том, что модифицированный плазмой подслоя, возникающий в первые моменты ионно-плазменного напыления металла, имеет постоянную толщину, а в процессе дальнейшего напыления изменяется толщина только слоя чистого металла, локализо-

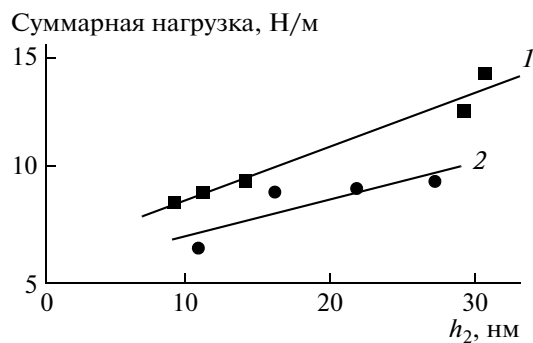


Рис. 5. Зависимость прочности двуслойного покрытия, умноженной на его суммарную толщину $\sigma_c(h_1 + h_2)$, от толщины металлического слоя h_2 для платинового (1) и золотого (2) покрытий, нанесенных ионно-плазменным методом на подложку ПЭТФ.

ванного на подслое. Это предположение имеет надежное экспериментальное обоснование.

Для анализа реальной ситуации рассмотрим тонкое покрытие, состоящее из двух слоев (рис. 4). Пусть прочность слоя 1 (так называемого подслоя) толщиной h_1 равна σ_1 , а прочность слоя 2 (слой чистого металла, расположенного на подслое) толщиной h_2 равна σ_2 . Тогда при разрушении покрытия оно будет нести нагрузку

$$F = \sigma_1 h_1 w + \sigma_2 h_2 w,$$

где w — ширина покрытия (образца). Эффективную прочность покрытия в данном случае находим делением полной приложенной силы F к сечению покрытия $w(h_1 + h_2)$:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1 h_1 + \sigma_2 h_2}{h_1 + h_2}$$

Здесь σ_c — общая прочность покрытия, которую мы определяем с помощью уравнения (1) и зависимость которой от общей толщины покрытия приведена на рис. 1. Эту зависимость можно переписать в виде

$$\sigma_c (h_1 + h_2) = \sigma_1 h_1 + \sigma_2 h_2 \quad (2)$$

Построив зависимость определенной с помощью соотношения (1) прочности покрытия, умноженной на его суммарную толщину $\sigma_c(h_1 + h_2)$, от толщины покрытия металлического слоя h_2 , можно получить из наклона прямых прочность блочного металла, а из отрезка, отсекаемого на оси ординат, — произведение прочности подслоя σ_1 на его толщину h_1 . Естественно, что при этом следует ограничиться значениями $h_2 > 10$ нм, поскольку при меньшей толщине единого металлического покрытия на поверхности полимера не образуется [5, 28]. Если предположение о двуслойной структуре покрытия верно, такая зависимость должна спрямляться в координатах уравнения (2).

Результат обработки экспериментальных данных, проанализированных ранее с помощью двуслойной модели в работах [8–10], представлен на рис. 5. Первое, что следует отметить, — удовлетворительное спрямление экспериментальных данных в координатах уравнения (2). Этот факт свидетельствует о том, что предположения, сделанные о двуслойной структуре покрытия, имеют реальное экспериментальное подтверждение. Оценка прочности чистых металлов из угла наклона зависимостей 1 и 2 на рис. 5 дает значение 243 МПа для платины и 168 МПа для золота. Приведенные величины количественно соответствуют известным значениям прочности для блочных металлов (240–350 МПа — для платины и 176–250 МПа для золота) [11]. При анализе значений, отсекаемых зависимостями 1 и 2 на оси ординат, была определена величина $\sigma_1 h_1$. Приняв толщину модифицированного плазмой слоя (подслоя) равной 80 нм, получаем значение его прочности $\sigma_1 \sim 77$ и ~ 66 МПа для ионно-плазменного напыления золотого и платинового покрытия соответственно. Как видно, прочность подслоя практически одинакова в обоих случаях, что естественно, поскольку режим ионно-плазменной обработки полимера был практически одинаков в обоих случаях (изменялась только природа металла).

В работе [21] с помощью уравнения (1) была оценена прочность модифицированного плазмой слоя в экспериментах по обработке плазмой ПЭТФ без напыления металла. В таком случае реализуется двуслойная система твердое покрытие на податливом основании, поэтому применение формулы (1) для оценки прочности покрытия вполне корректно. Значение прочности подслоя в данном случае составляло ~ 33.3 МПа. В обоих случаях прочность модифицированного плазмой слоя ПЭТФ толщиной 80 нм составляет несколько десятков мегапаскалей. Полученные оценки хорошо согласуются между собой, что подтверждает разумность допущений, сделанных при выводе формулы (2), и, в первую очередь, допущения о трехслойной структуре систем, образующихся при ионно-плазменном напылении благородных металлов на ПЭТФ.

Двукратное различие в определенных значениях прочности может быть связано с двумя причинами. Во-первых, при совместном воздействии плазмы и атомов (кластеров) благородных металлов на полимер образуется подслой, содержащий некоторое количество металла в своей структуре. Естественно, что при обработке полимера чистой плазмой такая структура не реализуется. Возможно, что именно внедрение атомов (кластеров) металла на первых этапах его напыления в этот модифицированный плазмой слой приводит к его упрочнению. Во-вторых, необходимо иметь в виду, что оценка толщины модифицированного

плазмой слоя (подслоя) недостаточно точная. Более того, указанный слой, видимо, не имеет острой границы, в связи с чем его схематическое изображение на рис. 4 является идеализированным. Возможно, что эти обстоятельства приводят к различию значений прочности модифицированного плазмой слоя, полученных с помощью уравнений (1) и (2).

Таким образом, в настоящей работе предложен новый метод оценки прочности покрытий, нанесенных на полимерные подложки, позволяющий анализировать деформационно-прочностные свойства трехслойных систем, которые возникают при нанесении нанометровых слоев благородных металлов на полимерные пленки методом ионно-плазменного напыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stutzmann N., Tervoort T.A., Bastiaansen K., Smith P.* // Nature. 2000. V. 407. P. 613.
2. *Bauer G., Pittner F., Schalkhammer T.* // Mikrochim. Acta. 1999. V. 131. P. 107.
3. *Svorcik V., Zehentner J., Rybka V., Slepcka P., Hnatowicz V.A.* // Appl. Phys. A. 2002. V. 75. № 4. P. 541.
4. *Efimenko K.J., Rybka V., Svorcik V., Hnatowicz V.A.* // Appl. Phys. A. 1999. V. 68. P. 479.
5. *Svorcik V., Slepitska P., Svorcikova J., Spirikova M., Zehentner J., Hnatowicz V.A.* // J. Appl. Polym. Sci. 2006. V. 99. № 4. P. 1698.
6. *Вольнский А.Л., Панчук Д.А., Садакбаева Ж.К., Большакова А.В., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. № 4. С. 369.
7. *Вольнский А.Л., Панчук Д.А., Садакбаева Ж.К., Большакова А.В., Кечекьян А.С., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Докл. РАН. 2009. Т. 427. № 4. С. 499.
8. *Вольнский А.Л., Моисеева С.В., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Докл. РАН. 2006. Т. 409. № 1. С. 64.
9. *Вольнский А.Л., Панчук Д.А., Моисеева С.В., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Рос. нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 1–2. С. 95.
10. *Вольнский А.Л., Панчук Д.А., Моисеева С.В., Кечекьян А.С., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Изв. РАН. Сер. хим. 2009. № 5. С. 847.
11. Handbook of Chemistry and Physics / Ed. by D. Charles., M.S. Hodgman. 1955. P. 1982.
12. *Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Bakeev N.F.* // J. Mater. Sci. 2000. V. 35. № 3. P. 547.
13. *Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Ozerin A.N., Bakeev N.F.* // J. Appl. Polym. Sci. 1999. V. 72. № 10. P. 1267.
14. *Вольнский А.Л., Баженов С.Л., Бакеев Н.Ф.* // Рос. хим. журн. (ЖВХО им. Д.И. Менделеева). 1998. Т. 42. № 3. С. 57.
15. *Bazhenov S.L., Volynskii A.L., Alexandrov V.M., Bakeev N.F.* // J. Polym. Sci., Polym. Phys. 2002. V. 40. № 1. P. 10.
16. *Zaporotchenko V., Strunskus T., Behnke K., Von Bechtolsheim C., Kiene V., Fapuel F.* // J. Adhesion Sci. Technol. 2000. V. 14. № 3. P. 467.
17. *Faue F., Willecke R., Thran A.* // Mater. Sci. Eng. R. 1998. V. 22. № 1. P. 1.
18. *Zaporotchenko V., Behnke K., Thran A., Strunskus T., Fapuel F.* // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 144–145. P. 355.
19. *Sharp J.S., Teichroeb J.H., Forrest J.F.* // Eur. Phys. J. E. 2004. V. 15. № 4. P. 473.
20. *Zaporotchenko V., Zekonyte J., Biswas A., Fapuel F.* // Surf. Sci. 2003. V. 532–535. № 7. P. 300.
21. *Панчук Д.А., Садакбаева Ж.К., Багров Д.В., Кечекьян А.С., Большакова А.В., Абрамчук С.С., Ярышева Л.М., Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. А. 2010. Т. 52. № 8. С. 1400.
22. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Физматлит, 2005.
23. *Рыбкин В.В.* // Соросовский образоват. журн. 2000. Т. 6. № 3. С. 58.
24. *Драчев А.И., Гильман А.Б., Пак В.М., Кузнецов А.А.* // Химия высоких энергий. 2002. Т. 36. № 2. С. 143.
25. *Klemberg-Sapieha E., Poitras J.D., Martinu L., Yamasaki N.L.S., Lantman C.W.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. V. 15. № 3. P. 985.
26. *Bergeron A., Klemberg-Sapieha J.E., Martinu L.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 16. P. 3227.
27. *da Silva Sobrinho A.S., Schuhler N., Klemberg-Sapieha J.E., Wertheimer M.R., Andrews M., Gujrathi S.C.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 16. № 4. P. 2021.
28. *Панчук Д.А., Садакбаева Ж.К., Пуклина Е.А., Большакова А.В., Абрамчук С.С., Ярышева Л.М., Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф.* // Рос. нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 5–6. С. 64.