

УДК 678.06

А. А. Мартинкевич¹, А. И. Глоба¹, Н. Р. Прокопчук¹, Т. Н. Воробьева²,
Э. Т. Крутько¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский государственный университет

РАЗРАБОТКА ПОЛИИМИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследована возможность создания термостойких пленкообразующих полимерных композиций для формирования защитных покрытий токопроводящих разводок металлических рисунков на полиимидных (ПИ) пленках, полученных путем низкотемпературной поликонденсации 4,4'-диаминодифенилового эфира с диангидридом пиромеллитовой кислоты в полярном апротонном растворителе – диметилформамиде с последующей термической циклодегидратацией образующейся полиамидокислоты в вакууме при постепенном подъеме температуры со скоростью 10°C/мин от 20 до 350°C. Предлагаемые для защиты токопроводящих дорожек, формируемых на ПИ-пленке, пленкообразующие композиции синтезировали на основе полиамидокислоты диангидрида 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, с добавлением комплексного модифицирующего реагента (эпоксидной смолы, содержащей тетрамалеамидокислоту).

Ключевые слова: полипиромеллитамидокислота, полиимид, полиимидная композиция, эпоксидная смола, тетрамалеамидокислота, функциональное покрытие.

A. A. Martinkevich¹, A. I. Hloba¹, N. R. Prokopchuk¹, T. N. Vorob'yova², E. T. Krut'ko¹

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian State University

POLYIMIDE COMPOSITIONS FOR FUNCTIONAL COATINGS

The possibility of creating heat-resistant film-forming polymer compositions for the formation of protective coatings for conductive wiring of metallic patterns for polyimide (PI) films was studied. Polyimide was obtained by low-temperature polycondensation of 4,4'-diaminodiphenyl ether with pyromellitic acid dianhydride in polar aprotic solvent – dimethylformamide with a gradual rise in temperature at a rate of 10°C/min from 20 to 350°C. The film-forming compositions proposed for the protection of current-carrying paths formed on the PI film were synthesized from polyamic acid based on dianhydride 3,3',4,4'-benzophenone tetracarboxylic acid and 4,4'-diaminodiphenyloxide with the addition of a complex modifying agent (epoxy resin containing tetramaleamic acid).

Key words: polypirromellitic acid, polyimide, polyimide composition, epoxy resin, tetramaleamic acid, functional coating.

Введение. Постоянное совершенствование современной техники и технологии с целью создания новых изделий и устройств электронной, электротехнической, авиационной, космической и других отраслей промышленности предъявляет все возрастающие требования к используемым полимерным материалам, в том числе выполняющим защитные функции.

Среди известных пленкообразующих полимеров особое место занимают полиимиды (ПИ), отличающиеся уникальным комплексом деформационно-прочностных, электрофизических и термических свойств, сохраняющихся в широком температурном интервале [1–5]. Основным недостатком этого класса полимеров является невысокая адгезионная способность их к защищаемым субстратам [6, 7]. Решение данной проблемы возможно как за счет использования новых мономеров при синтезе поли-

амидокислот, так и путем химической модификации выпускаемых форполимеров полифункциональными реагентами. Анализ многочисленных исследований в области синтеза и изучения свойств новых ароматических ПИ, проведенный, например, в обзоре [8] и в других источниках, показал, что в настоящее время для достижения максимального соответствия свойств ПИ требованиям конкретных областей их применения наряду с варьированием строения диаминовой и диангидридной компонент макромолекул, используется и метод химической модификации известных форполимеров различными агентами. В качестве модифицирующих агентов применяют органические, неорганические вещества, элементарноорганические соединения. Это могут быть реакционноспособные мономеры, олигомеры и полимеры. Большой модифицирующий эффект может дать

использование имидосодержащих моно- и олигомеров для улучшения ряда эксплуатационных характеристик этого класса полимеров. Исследования по модифицированию ПИ олиго- и полимерными модификаторами проводятся уже более 35 лет. Начаты они с изучения свойств материалов, полученных из смесей полиамидокислот (ПАК) [9–11].

Авторами работы [12] получены сетчатые ПИ из полиаминоимида и пиромеллитамидокислот, проведено изучение влияния амидокислот на формирование структуры сополимеров, в частности, на частоту сшивки. Показана возможность улучшения термических и деформационно-прочностных свойств полипиромеллитимидных пленок путем введения в качестве модифицирующей добавки в поли-4,4'-дифенилоксидпиромеллитимид на стадии ПАК доступных алкилфенолформальдегидной и эпоксидной смол [13, 14].

Однако в работе [14] показано, что адгезионные свойства пленкообразующих композиций полиимидов на основе 3,3',4,4'-диангирида пиромеллитовой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, модифицированных только эпоксидной смолой, недостаточно высоки.

Ранее проведенные исследования химической модификации полиимидов N,N'-бис-малеинимидами различного химического строения показали, что введение этих бифункциональных модифицирующих соединений при термической твердофазной циклодегидратации обеспечивает увеличение молекулярной массы полиимидов как за счет взаимодействия модификатора с концевыми группами ПАК, так и за счет образования межцепных сшивок, не исключая при этом и гомополимеризацию N,N'-бис-малеинимида [15].

Это обусловлено способностью двойной связи в N,N'-бис-малеинимиде активироваться соседними карбонильными группами имидного цикла и раскрываться при взаимодействии с соединениями, содержащими подвижный атом водорода. Эти процессы в совокупности приводят к изменению химической структуры полиимида,

что является причиной изменения механических, термических и адгезионных свойств полимера.

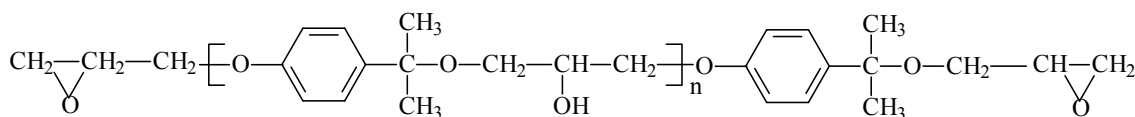
Присутствие же в молекуле модификатора четырех аналогичных малеинимидных и особенно малеинамидокислотных групп позволяет еще в большей степени усилить межмолекулярное взаимодействие в системе полимерной композиции и увеличить адгезию защитного покрытия, формируемого на субстратах различной природы.

Так, добавки в раствор полиамидокислоты полипиромеллитимида (ПАК-ПИМ) не только бифункциональных N,N'-бис-малеинимидов (БМИ), но и реакционно-способных полифункциональных олигомеров, обеспечивает повышение механических, термических и адгезионных свойств пленок, получаемых на основе таких пленкообразующих композиций [15, 16].

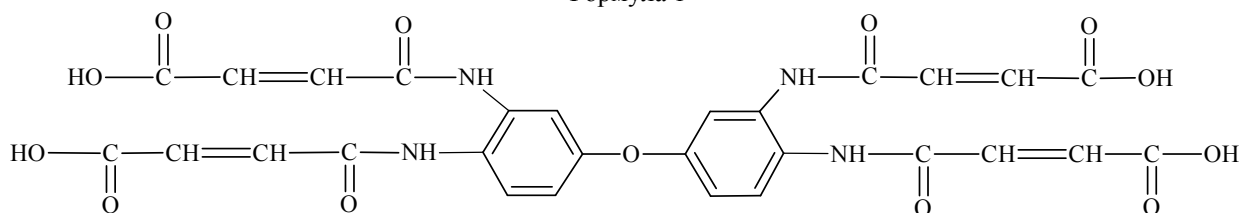
Цель данной работы – синтез и изучение свойств полиимидных пленкообразующих композиций, получаемых на основе диангирида 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, модифицированных эпоксидной смолой (ЭС) марки Э-41р (формула 1), тетрамаалеамидокислотой (формула 2) и при их совместном присутствии.

Основная часть. Исследование проводили с использованием форполимера полиимида – полиамидокислоты (ПАК), относительная вязкость 0,5%-ного раствора которого в ДМФА при 20°C составляла 1,70–1,80.

В качестве мономеров для синтеза ПАК использовали свежеперекристаллизованные 4,4'-диаминодифенилоксид и диангидрид 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты. 4,4'-Диаминодифенилоксид очищали перекристаллизацией из изопропилового спирта с последующей сушкой при комнатной температуре. Диангидрид 3,3',4,4'-бензофенон-тетракарбоновой кислоты ($T_{пл} = 221–222^\circ\text{C}$) очищали кипячением в уксусном ангидриде с последующей возгонкой в вакууме. ДМФА сушили над гидридом кальция (CaH_2) и перегоняли под вакуумом, отбирая фракцию с $T_{кип} = 86^\circ\text{C}$ (5,5 кПа).



Формула 1



Формула 2

Синтез ПАК проводили низкотемпературной поликонденсацией эквимольных количеств исходных мономеров в диметилформамиде при температуре реакционной смеси 10°C по схеме 1.

В качестве модифицирующих агентов использовали эпоксидную смолу ЭД-41р и N,N,N',N'-тетрамалеамидокислоту, которую синтезировали взаимодействием N,N',N,N'-тетрааминодифенилоксида с малеиновым ангидридом в диметилформамиде по схеме 2.

Получение композиций форполимера проводили путем введения в раствор ПАК в диметилформамиде (ДМФА) расчетных коли-

честв модифицирующих компонентов – эпоксидного олигомера, содержащего N,N,N',N'-тетрамалеамидокислоту, перемешивали композицию в течение заданного времени до получения однородной массы и из полученных растворов отливали пленки на стеклянные подложки. Растворитель удаляли в вакууме при повышенной температуре. Пленки снимали с подложки и проводили их высокотемпературную твердофазную имидизацию путем прогрева в вакууме или инертной среде при ступенчатом повышении температуры от 20 до 350°C.

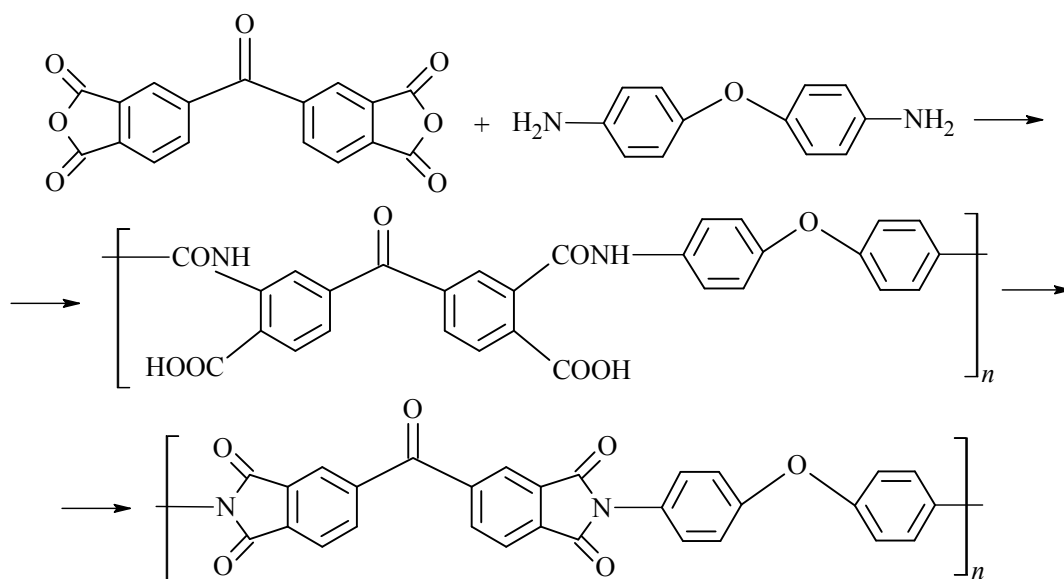


Схема 1

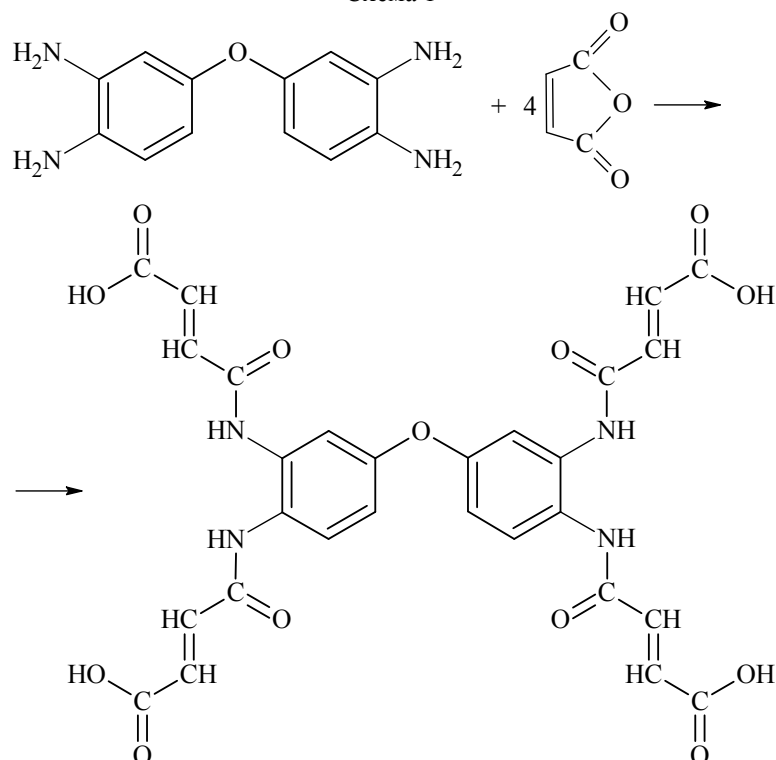


Схема 2

Контроль процесса термической циклодегидратации пленок, формируемых из полученных композиций, осуществляли методом ИК-спектроскопии с использованием Фурье-ИК-спектрометра Nicolet 7101 в диапазоне частот 4000–300 см⁻¹.

Деформационно-прочностные свойства модифицированных полиимидных пленок определяли на разрывной машине УМИВ (зажимная длина образца 25 мм, ширина 5 мм, толщина пленки 20–25 мкм) с постоянной скоростью растяжения 50 мм/мин. Погрешность определения составляла 5% с надежностью 0,95.

Изучение термостойкости образцов пленок полученных композиций проводили с помощью термоаналитической системы TGA/DSC1 Mettler Tobdo (Швейцария) в температурном интервале 20–800°C со скоростью нагрева 5°C/мин.

Эластичность покрытия медного рисунка, предварительно сформированного на полиимидной пленке (ПИ), полученной на основе диангирида пиромеллитовой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, оценивали по числу перегибов на 180° при радиусе стержня 1 мм, которое выдерживало без растрескивания и отслаивания от защитного полиимидного слоя.

Адгезию защитного покрытия к металлоорганическому рисунку и полиимидной подложке определяли методом нормального отрыва участков поверхности покрытия.

Коррозионную стойкость медных проводников оценивали косвенно по падению их удельной электропроводности, которую опре-

деляли после выдерживания образцов в камере влажности (температура 40°C, относительная влажность 98%, 10 сут) и выражали в процентах по отношению к удельной электропроводности проводников перед загрузкой в камеру влажности.

Пленкообразующие композиции получали путем смешивания 20%-ного раствора ПАК в диметилформамиде (ДМФА) с расчетным количеством эпоксидной смолы и тетрамаалеамидокислоты (ТМАК).

Полученную композицию наносили на полиимидную пленку (ПИ) с нанесенным на ней металлическим рисунком методом полива или окунания.

При этом происходит удаление большей части растворителя. После сушки полученный защитный слой подвергали термообработке в вакууме при постепенном подъеме температуры от 100 до 300°C в течение 180 мин. В результате образовывалось прочно сцепленное с полиимидной подложкой эластичное защитное покрытие, обеспечивающее надежную защиту металлических проводников гибкой печатной платы от коррозии.

Таким образом, получены пленкообразующие композиции полиамидокислоты на основе 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, содержащие 2–5 мас. ч. эпоксидной смолы и 1–3 мас. ч. тетрамаалеамидокислоты.

В таблице приведены результаты термических и механических характеристик полученных пленок.

Сравнительные характеристики защитного покрытия, формируемого на ПИ пленке, с нанесенным на нее металлическим рисунком

Соотношение компонентов, мас. ч.			Деформационно-прочностные и термические свойства			Адгезия, Н/см ²	Количество перегибов на 180°
ПАК	ТМАК	ЭС	прочность при разрыве, МПа	относительное удлинение при разрыве, %	температура деструкции, °С		
100	–	–	139	32	499	8	2–3
97	–	3	145	14	518	16	4–7
97	3	–	150	13	500	18	19–21
94	3	3	160	10	515	36	27–30
96	1	3	155	16	520	44	30–34
95	–	5	105	6	500	18	25–27
92	3	5	140	11	490	17	28–32
97	1	2	145	18	500	16	26–28
95	2	3	150	16	505	19	29–32

Примечание. Деформационно-прочностные и термические характеристики композиций определяли на неадгезированных пленках; адгезию и эластичность (количество перегибов на 180°) композиций – при формировании из них защитных покрытий функциональных медных рисунком на ПИ пленке.

Судя по результатам, приведенным в таблице, формируемая на стадии термической твердофазной имидизации сетчатая структура ароматического полиимида за счет реакционноспособных групп ЭС (содержание ЭС в композиции 3 мас. %) и функциональных групп ПАК предопределяет более высокие показатели термостойкости (температура термоокислительной деструкции возрастает на 19°C) и деформационно-прочностных свойств (прочность при разрыве возрастает на 6% и составляет 145 МПа) по сравнению с немодифицированным ПИ на основе ПАК-1.

Прочность при разрыве пленок, содержащих оптимальное количество каждого из модификаторов, возрастает на 11%, но при значительном (на 31%) снижении относительного удлинения при разрыве. Температура начала термоокислительной деструкции достигает 520°C. Это связано, по всей видимости, с тем, что данные модификаторы способствуют формированию в структуре ПИ сетчатой организации типа «сетка в сетке», что ведет к улучшению таких эксплуатационных характеристик ПИ пленок, как термостойкость и адгезия.

Особую ценность представляет тот факт, что введение в ПАК реакционноспособных модификаторов в определенной концентрации приводит к повышению адгезии покрытий к ПИ подложке и медному рисунку, нанесенному на нее, в комплексе с высокой эластичностью, оцениваемой по количеству перегибов такой структуры на 180°.

Использование композиции, содержащей 1 мас. % ТМАК и 3 мас. % олигомерной ЭС, позволило получить высококачественные защитные покрытия функциональных медных рисунков на ПИ пленке.

Повышенные температуры деструкции пленок полученных полиимидов из полиамидокислотных композиций по сравнению с немодифицированным полиимидом сохраняются для всех исследованных образцов (518–520°C).

В процессе модификации полиимида БЗФ-ДФО эпоксидной смолой и тетраамалеамидокислотой наблюдается экстремальная зависимость прочности при разрыве и начала термоокислительной деструкции от количества модификатора. Концентрации модифицирующих компонентов, при которых достигается оптимальный комплекс термических и деформаци-

онно-прочностных свойств полиимидных композиций, составляет 2–5 мас. ч. эпоксидной смолы и 1–3 мас. ч. тетраамалеамидокислоты. Для максимального улучшения прочностных характеристик пленкообразующих покрытий из предлагаемых композиций оптимальное значение количеств модифицирующих реагентов составляет: эпоксидная смола – 3 мас. ч., тетраамалеамидокислота – 1 мас. ч.

Более эластичны защитные полиимидные покрытия, полученные при содержании эпоксидной смолы 3 мас. ч., а тетраамалеамидокислоты 1 мас. ч., относительное удлинение их при разрыве составило 16%. Наиболее устойчива к комплексному воздействию температурно-силовых полей пленкообразующая композиция, состава: 3 мас. ч. эпоксидной смолы, 1 мас. ч. тетраамалеамидокислоты.

Сравнительное ИК-спектроскопическое исследование термической циклодегидратации показало, что в немодифицированных и модифицированных полиамидокислотных пленках, содержащих эпокси- и ОН-группы эпоксидной смолы, карбоксильные группы тетраамалеамидокислоты, сшивание макромолекул ПАК происходит по концевым группам полиамидокислоты. Это предположение основывается на том, что при термической циклодегидратации модифицированных композиций уменьшения их степени имидизации по сравнению с немодифицированными образцами не наблюдается, т. е. такое взаимодействие равнозначно повышению длины цепи макромолекул полиамидокислот, обуславливая улучшение прочности образцов термообработанных пленок.

Заключение. Таким образом, проведенные исследования показали, что сформированные из полученных полиимидных композиций защитные покрытия функциональных медных рисунков на полиимидных пленках обладают высокими термическими свойствами, пленкообразующей способностью, эластичностью, повышенными деформационно-прочностными показателями, улучшенной адгезией к металлическому слою на полиимидной пленке по сравнению с немодифицированным полимером и могут быть использованы для создания защитных покрытий функциональных металлических рисунков, формируемых из электрохимических растворов на полиимидной пленке ПМ.

Литература

1. Полиимиды – новый класс термостойких полимеров / Н. А. Адлова [и др.]; под общ. ред. М. М. Котона. Л.: Наука, 1968. 212 с.
2. Полиимиды – класс термостойких полимеров / М. И. Бессонов [и др.]; под общ. ред. М. И. Бессонова. Л.: Наука, 1983. 308 с.
3. Бюллер К. У. Тепло- и термостойкие полимеры. М.: Химия, 1984. 530 с.

4. Полиимиды. Синтез, свойства, применение / Э. Т. Крутько [и др.]; под общ. ред. Н. Р. Прокопчука. Минск: БГТУ, 2002. 303 с.
5. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 623 с.
6. Vorob'yova T. N. Adhesion interaction between electrolessly deposited copper film and polyimide // *J. Adhes. Sci. Techn.* 1997. Vol. 11. No. 2. P. 167–182.
7. Химическая металлизация полиимидных пленок: получение и механизм процесса / Е. Л. Вечеркина [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А.* 2007. Т. 49, № 2. С. 246–253.
8. Lee C. J. Polyimidesiloxanes: chemistry and applications // *Polymers for electronic and ftonicapplication*. Princeton, New Jersey, 1992. 98 p.
9. Смирнова В. Е. О структуре полиимидных композиций из смесей полиамидокислот // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А.* 1985. Т. 17, № 9. С. 1954–1961.
10. Смирнова В. Е. Механические свойства и способы получения высокомолекулярных пленок из полиимидных композиций // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А.* 1991. Т. 33, № 11. С. 2445–2451.
11. Повышение термостабильности полиалканимида с помощью специальных добавок / Е. В. Калугина [и др.] // *Пластические массы.* 1993. № 3. С. 30–32.
12. Сетчатые полиимиды с пиромеллитимидными межузловыми фрагментами / А. П. Краснов [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А.* 1997. Т. 39, № 4. С. 600–605.
13. Химическая модификация полипиромеллитимидных пленок олигомерными смолами / О. В. Меньшикова [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Сер. хім. навук.* 2003. № 1. С. 76–80.
14. Химическая модификация эпоксидного олигомера форполимером полиимида / А. В. Николайчик [и др.] // *Материалы. Технологии. Инструменты.* 2004. Т. 9, № 4. С. 44–49.
15. Модифицированный поликапроамид и клей-расплав на его основе / Н. Р. Прокопчук [и др.] // *Труды БГТУ.* 2018. № 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. С. 40–45.

References

1. Adrova N. A., Bessonov M. I., Lius L. A., Rudakov A. P. *Poliimidy – novyy klass termostoykikh polimerov* [Polyimides – a new class of heat-resistant polymers]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 212 p.
2. Bessonov M. I., Koton M. M., Kudryavcev V. V., Layus L. A. *Poliimidy – klass termostoykikh polimerov* [Polyimides – class of heat-resistant polymers]. Leningrad, Nauka Publ. 1983. 308 p.
3. Byuller K. U. *Teplo- i termostoykiye polimery* [Heat and heat resistant polymers]. Moskow, Khimiya Publ., 1984. 530 p.
4. Krut'ko E. T., Prokopchuk N. R., Martinkevich A. A., Drozdova D. A. *Poliimidy. Sintez, svoystva, primeneniye* [Polyimides. Synthesis, properties, application]. Minsk, BGTU Publ., 2002. 303 p.
5. Mikhaylin Yu. A. *Termoustoychivyye polimery i polimernyye materialy* [Heat-resistant polymers and polymeric materials]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2006. 623 p.
6. Vorob'yova T. N. Adhesion interaction between electrolessly deposited copper film and polyimide. *Journal Adhesives. Sci. Tech.* 1997, vol. 11, no. 2, pp. 167–182.
7. Vecherkina E. L., Kudaykulova S. K., Iskakov R. M., Zhubanov B. A., Voytekunas V., Abadie J. M. Chemical metallization of polyimide films: production and mechanism of the process. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds], 2007, series A, vol. 49, no. 2, pp. 246–253 (In Russian).
8. Lee C. J. Polyimidesiloxanes: chemistry and applications. *Polymers for electronic and ftonicapplication*. Princeton, New Jersey, 1992. 98 p.
9. Smirnova V. E. About the structure of polyimide compositions from mixtures of polyamidic acids *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds], 1985, series A, vol. 17, no. 9, pp. 1954–1961 (In Russian).
10. Smirnova V. E. Mechanical properties and methods for producing high modulus films from polyimide compositions. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds], 1991, series A, vol. 33, no. 11, pp. 2445–2451 (In Russian).
11. Kalugina E. V., Kuleznev V N, Gumargalieva K. Z., Zaikov G. E. Increasing the thermal stability of polyalkanimide with the help of special additives. *Plasticheskiye massy* [Plastics], 1993, no. 3, pp. 30–32 (In Russian).
12. Krasnov A. P., Mit' V. A., Federova S. L., Komarova L. I. Mesh polyimides with pyromellitimide inter-node fragments. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds], 1997, series A, vol. 33, no. 39, pp. 600–605 (In Russian).
13. Men'shikova O. V., Prokopchuk N. R., Krut'ko E. T., Paplevko I. G. Chemical modification of polypyromellitimide films by oligomeric resins. *Vesti NAN Belarusi. Ser. khim. navuk* [Series Chemical Sciences. News of NAS of Belarus], 2003, no. 1, pp. 76–80 (In Russian).

14. Nikolaychik A. V., Prokopchuk N. R., Martinkevich A. A., Krut'ko E. T. Chemical modification of epoxy oligomer with polyimide prepolymer. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technology. Instruments], 2004, vol. 9, no. 4, pp. 44–49 (In Russian).

15. Prokopchuk N. R., Krut'ko E. T., Zhuravleva M. V., Hloba A. I. Modified polycaproamide and hot melt glue based on it. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2018, no. 2: Chemical Engineering, Biotechnologies, Geocology, pp. 40–45 (In Russian).

Информация об авторах

Мартинкевич Александр Александрович – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alexalleycat@mail.ru

Глоба Анастасия Ивановна – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Orion-2308@yandex.ru

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tnsippm@belstu.by

Воробьева Татьяна Николаевна – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры неорганической химии. Белорусский государственный университет (200006, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, лаб. 611, Республика Беларусь). E-mail: vorob@bsu.by

Крутько Эльвира Тихоновна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ela_krutko@mail.ru

Information about the authors

Martinkevich Alexander Alexandrovich – PhD (Chemistry), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexalleycat@mail.ru

Hloba Nastassia Ivanovna – PhD (Chemistry), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Orion-2308@yandex.ru

Prokopchuk Nicolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tnsippm@belstu.by

Vorob'yova Tat'yana Nikolayevna – DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Non-organic Chemistry. Belarusian State University (lab. 611, 14, Leningradskaya str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vorob@bsu.by

Krut'ko El'vira Tikhonovna – DSc (Technology), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ela_krutko@mail.ru

Поступила 01.07.2019