

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

УДК 541.64:542.954

СИНТЕЗ ОРГАНОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИИМИДОВ И ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ СВЕТОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2020 г. Д. А. Сапожников^{a,*}, Б. А. Байминов^a, А. В. Чучалов^{a,b}, С. Л. Семенов^c,
А. Ф. Косолапов^c, О. Н. Забегаева^a, Я. С. Выгодский^a

^a Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

^b Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9, Россия

^c Научный центр волоконной оптики Российской академии наук
119333 Москва, ул. Вавилова, 38, Россия

*e-mail: ssddaa@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.08.2019 г.

После доработки 17.09.2019 г.

Принята к публикации 24.09.2019 г.

Одностадийной высокотемпературной полициклоконденсацией синтезированы гомо- и сополиимиды, содержащие атомы F, Cl или Si, COOH-, OH- и кардовые группы. Показано влияние строения полимера на его растворимость, термические, механические, оптические свойства и использование в качестве покрытия. Полученные полимеры с $\eta_{\text{in}} = 0.3\text{--}1.3$ дл/г характеризуются высокими тепло- и термостойкостью ($240^\circ\text{C} \leq T_c \leq 375^\circ\text{C}$, $440^\circ\text{C} \leq T_{10\%} \leq 580^\circ\text{C}$), а также формируют высокопрочные пленки ($55 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 140 \text{ МПа}$; $1.1 \text{ ГПа} \leq E \leq 2.8 \text{ ГПа}$). Разработанные полиимиды перспективны в роли новых высокотермостабильных защитных покрытий, в частности световодов, механические свойства которых не меняются после продолжительной выдержки при 300°C .

DOI: 10.31857/S2308113920010076

Несмотря на значительные достижения в области синтеза полиимидов и их разностороннее практическое применение в ряде высоких технологий, они по-прежнему остаются востребованными и актуальными, в основном для изготовления материалов с комплексом предъявляемых требований: высокотермостойких защитных покрытий [1–4], оптически прозрачных пленок с низким коэффициентом термического расширения [5–8], газоразделительных мембран [9, 10], пен и других материалов [1, 10–12].

Существенным недостатком большинства промышленных полиимидов является плохая растворимость в органических растворителях, затрудняющая их переработку. Введение в структуру полимеров различных фрагментов, например кардовых групп [13, 14], фторированных или алифатических [5–8, 11, 15, 16], позволяет синтезировать органорастворимые полимеры и значительно упростить технологию изготовления материалов с варьируемыми характеристиками.

В обзоре [17] детально рассмотрен эффект введения разных боковых и функциональных групп

в структуру ПИ и показано, что природа боковых фрагментов значительно влияет на растворимость полимеров, их тепло- и термостойкость, оптические свойства, эффективность газоразделения, протонную проводимость и т.д. Новые свойства таких полиимидов определяют их использование в различных высоких технологиях.

Ранее нами была продемонстрирована возможность применения органорастворимых полиимидов [18–20], полиамидов [21] и некоторых сополимеров в создании высокотермостабильных защитных покрытий световодов. Следует отметить, что традиционный способ изготовления высокотермостойких полиимидных покрытий световодов основан на применении растворов ПАК и имеет ряд существенных недостатков [3, 4, 22, 23]. В работе [20] был синтезирован и испытан фторированный сополиимид ПИ-1 с комплексом ценных свойств: высокими термическими, механическими и оптическими характеристиками, прекрасной растворимостью во многих органических растворителях, в том числе и легколетучих, что делает возможным изготовление покрытий

при разной температуре. Однако мономеры с перфторалкиленовыми фрагментами имеют высокую стоимость. На примере гораздо более коммерчески доступного ПИ-2 нами были установлены наиболее благоприятные вязкостные характеристики полимерных растворов, а также параметры и условия вытяжки световода и формирования полиимидного покрытия [18].

Цель настоящей работы – синтез гомо- и (со)полиимидов, содержащих атомы F, Cl или Si, COOH-, OH- и карбонильные группы, изучение влияния этих атомов и групп на свойства полимеров, технологичность изготовления покрытий световодов на их основе и сравнение эксплуатационных характеристик световодов с новыми защитными покрытиями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные соединения

3,5-Диаминобензойная кислота ($T_{пл} = 236–237/234–235^{\circ}\text{C}$ (здесь и далее в знаменателе приведены значения $T_{пл}$ по данным каталога “Aldrich”), 9,9-бис-(*n*-аминофенил)флуорен ($T_{пл} = 236–237/234–235^{\circ}\text{C}$), 4,4'-диаминодифенил-1,1,1,3,3,3-гексафторпропан-2 ($T_{пл} = 194–196/195–198^{\circ}\text{C}$), 2-хлор-1,4-диаминобензол ($T_{пл} = 65–67/62–66^{\circ}\text{C}$), 2,5-дихлор-1,4-диаминобензол ($T_{пл} = 169–170/164–166^{\circ}\text{C}$), 3,3'-дигидроксибензидин ($T_{пл} = 240/238^{\circ}\text{C}$), диангидрид 2,2-бис-(3,4-дикарбоксифенил)-1,1,1,3,3,3-гексафторпропана ($T_{пл} = 244–245/244–247^{\circ}\text{C}$) и диангидрид 3,3',4,4'-тетракарбосидифенилоксида ($T_{пл} = 229–230/225–229^{\circ}\text{C}$) очищали возгонкой в вакууме (20 Па) при температуре, близкой к их температуре плавления. Экспериментально установленные температуры плавления мономеров соответствовали литературным данным. 1,3-Бис-(3-аминопропил)-1,1,3,3-тетраметилдисилоксан очищали вакуумной перегонкой в токе аргона ($T_{кип.} \approx 133^{\circ}\text{C}/3 \text{ мм рт. ст.}$).

m-Крезол перегоняли в вакууме ($T_{кип.} \approx 100^{\circ}\text{C}/10 \text{ мм рт. ст.}$). *N*-метил-2-пирролидон (МП) перегоняли над CaH_2 в вакууме, ДМФА и хлороформ использовали без предварительной очистки.

Синтез полиимидов

Полиимиды получали с количественным выходом одностадийной высокотемпературной поликонденсацией в *m*-крезоле или МП в присутствии бензойной кислоты в качестве катализатора или без нее [13, 14].

В ИК-спектрах всех полученных полимеров присутствуют характерные для имидных циклов полосы поглощения [13, 14].

Изготовление пленок и покрытий

Пленки полимеров ПИ-1–ПИ-4 получали литьем их растворов в хлороформе на целлофановую подложку, а пленки из ПИ-5–ПИ-7 – литьем растворов в МП на стеклянную подложку и нагревании при $\sim 50–70^{\circ}\text{C}$. Образцы толщиной $\sim 20–30 \text{ мкм}$ сушили в вакууме при $70–150^{\circ}\text{C}$.

Полиимидные покрытия световодов формовали из 20%-ных растворов полимеров в МП на 9 м вытяжной башне [18, 20]. Покрытия из ПИ-1–ПИ-5 изготавливали с добавлением 2 мас. % 3-аминопропилтриэтоксисилана в качестве аппрета. Покрытия из ПИ-6 и ПИ-7 формовали *in situ* из полученного раствора полимера без промутера адгезии.

Методы исследования

Логарифмическую вязкость η_{ln} растворов 0.05 г полимера в 10 мл МП определяли в вискозиметре Оствальда при 25°C .

ИК-спектры снимали на спектрометре “Tensor 37” (“Bruker”), образцы прессовали с KBr.

Термостойкость полимеров характеризовали методом динамического термогравиметрического анализа на воздухе при скорости нагревания 5 град/мин на дериватографе Q1500 (производство фирмы MOM Венгрия) на образцах массой $\sim 15 \text{ мг}$.

Термомеханические кривые снимали на приборе фирмы “TA Instruments” TMA Q400 диаметр зонда 2.54 мм, сила нагружения 1Н (100 г), скорость нагревания 5 град/мин.

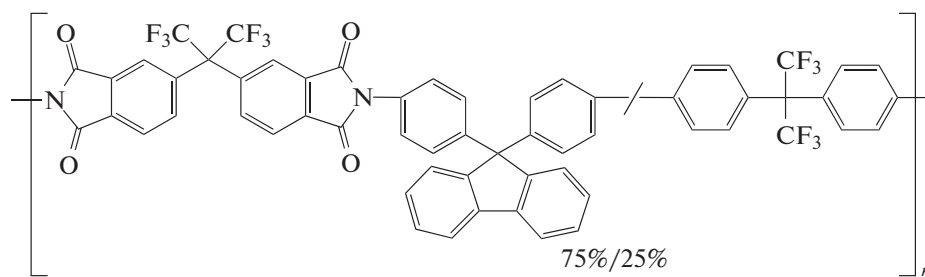
Физико-механические испытания пленок проводили на динамометре типа “Поляни”.

Оптическое пропускание пленок измеряли на спектрофотометре “Perkin Elmer Lambda 900”.

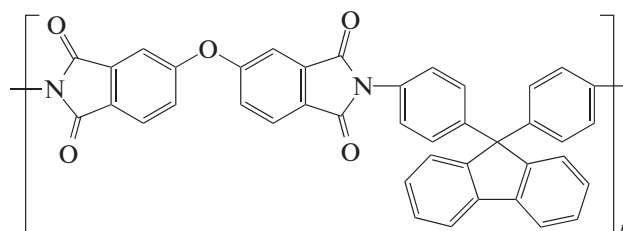
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез и свойства полиимидов

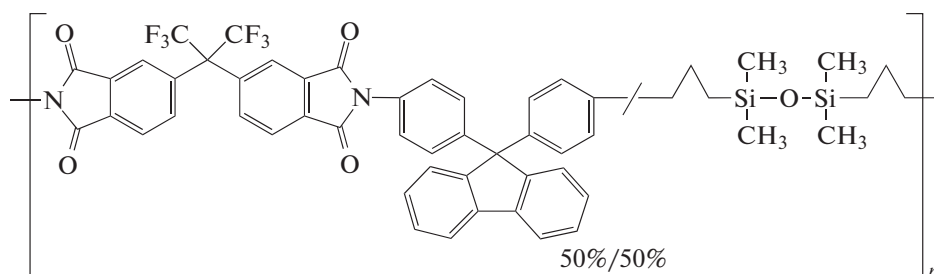
С целью изучения влияния строения ПИ на свойства покрытий световодов одностадийной высокотемпературной поликонденсацией в растворе синтезированы следующие (со)полиимиды:



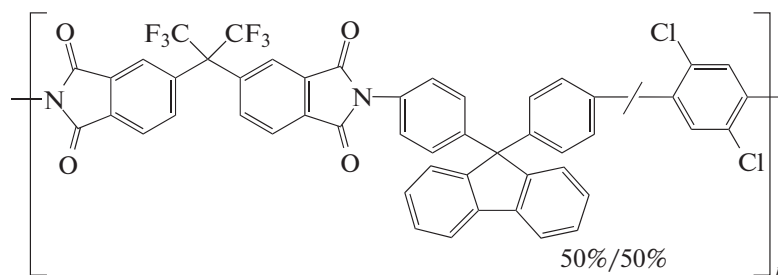
ПИ-1



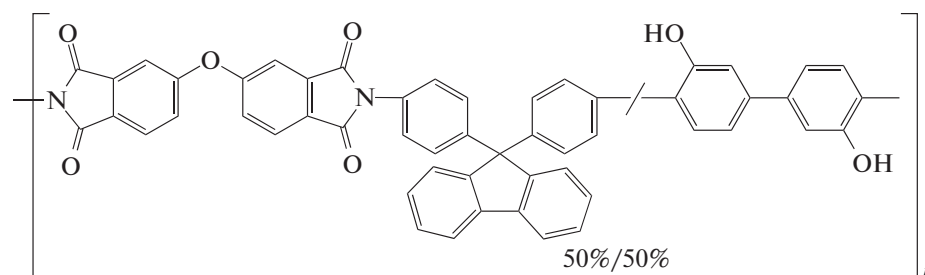
ПИ-2



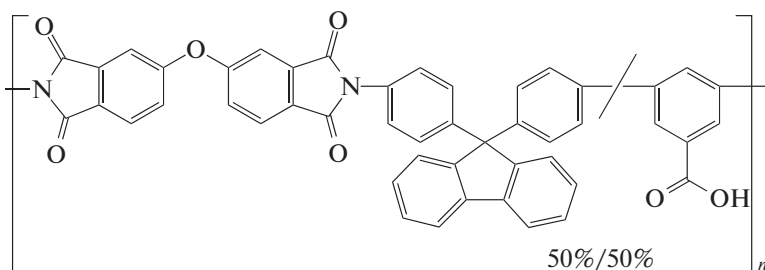
ПИ-3



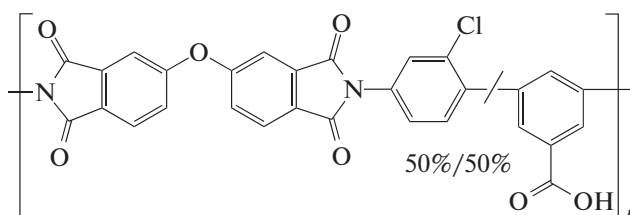
ПИ-4



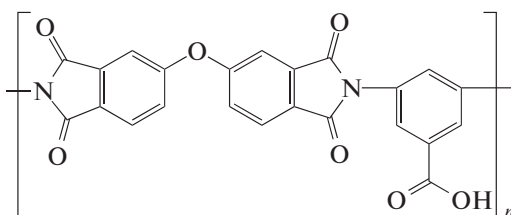
ПИ-5



ПИ-6



ПИ-7



ПИ-8

Как было показано нами ранее, органорастворимые ПИ-1 [20] и ПИ-2 [18] образуют высоко-термостабильные защитные покрытия световодов, выдерживающие прогревание при 300°C в течение 24 ч и кратковременно (30 с) при 430°C без критической потери прочности световодом. Однако для достижения удовлетворительной адгезии таких покрытий к волокну требуется аппрет, что осложняет технологический процесс из-

готовления покрытия и значительно сокращает время жизни раствора. Альтернативой фторированным мономерам при создании оптически прозрачных полиимидных пленок могут выступать кремний- и хлорсодержащие диамины [24–31]. Предполагалось, что введение диметилсилоксановых фрагментов в цепь ПИ также будет способствовать повышению сродства полиимидного по-

Таблица 1. Условия синтеза и свойства (со)полиимидов

Полимер	Растворитель	Бензойная кислота	Время реакции, ч	η_{ln} , дл/г	Растворимость		
					МП	ДМФА	Хлороформ
ПИ-1	<i>m</i> -Крезол	+	5	1.3	+	+	+
ПИ-2	<i>m</i> -Крезол	+	4	1.2	+	+	+
	МП	–	8	0.4	+	+	+
ПИ-3	<i>m</i> -Крезол	+	9	0.3	+	+	+
ПИ-4	<i>m</i> -Крезол	+	17	0.4	+	+	+
ПИ-5	<i>m</i> -Крезол	+	4	0.6	+	+	–
ПИ-6	<i>m</i> -Крезол	+	5	1.0	+	+	–
	МП	–	5	1.3	+	+	–
ПИ-7	МП	–	11	0.5	+	±	–
ПИ-8	МП	–	3	0.7	±	–	–

Примечание. Для растворимости: плюс – растворим при комнатной температуре, плюс-минус – растворим при нагревании, минус – нерастворим.

Таблица 2. Термические и механические свойства (со)полиимидов

Полимер	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_{10\%}, ^\circ\text{C}$	Пленки		
			σ , МПа	E , ГПа	ϵ , %
ПИ-1	355	530	95	1.1	25
ПИ-2	375	580	90	1.2	10
ПИ-3	240	440	55	1.3	7
ПИ-4	350	530	90	2.4	5
ПИ-5	360	520	140	2.8	8
ПИ-6	345	540	135	1.2	15
ПИ-7	315	515	120	1.5	10
ПИ-8	330	520	140	1.2	15

Примечание. σ – прочность на разрыв, E – модуль упругости при растяжении, ϵ – разрывное удлинение.

крытия к поверхности кварцевого световода [24, 32, 33].

В качестве исходных мономеров нами были выбраны 1,3-бис-(3-аминопропил)тетраметилдисулфоксан и 2,5-дихлор-*n*-фенилендиамин. Введение в структуру сополимера ПИ-3 гибких диметилсилоксановых фрагментов приводит к снижению различных характеристик полимера: $\eta_{\text{in}} = 0.3$ дл/г, $T_c = 240^\circ\text{C}$, $T_{10\%} = 440^\circ\text{C}$, почти в 2 раза уменьшается разрывная прочность пленок по сравнению с пленками ПИ-1 и ПИ-2 (табл. 1 и 2).

Следует отметить, что ПИ-4 на основе 2,5-дихлор-*n*-фенилендиамина с $\eta_{\text{in}} = 0.4$ дл/г образуется после продолжительного времени реакции (17 ч). Его термические и механические параметры сопоставимы с ПИ-1 и ПИ-2: $T_c = 350^\circ\text{C}$, $T_{10\%} = 530^\circ\text{C}$, для пленки $\sigma = 90$ МПа, $E = 2.4$ ГПа, $\epsilon = 5\%$ (табл. 1).

ПИ-3 и ПИ-4 растворимы в МП, ДМФА, хлороформе и в других растворителях. Установлено, что покрытия из ПИ-3 и ПИ-4 проявляют недостаточную адгезию к световоду. Применение 3-аминопропилтриэтоксисилана (2 масс. % от полимера) нивелирует этот недостаток.

Для улучшения адгезии покрытий к световоду без добавления аппрета синтезированы ПИ-5 и ПИ-6, содержащие группы НО и НООС. Оба сополимида, полученные в *m*-крезоле в присутствии катализатора, имеют высокую ММ ($\eta_{\text{in}} = 0.6$ – 1.0 дл/г), тепло- и термостойкость ($T_c = 345$ – 360°C , $T_{10\%} = 520$ – 540°C). Они растворимы при комнатной температуре в ДМФА и МП. Из растворов в последнем были отлиты прозрачные бесцветные пленки с разрывной прочностью 135–140 МПа. Вероятнее всего, рост прочностных характеристик по сравнению с ранее описанными полимерами связан с образованием водо-

родных связей. При этом ПИ-5 формирует окрашенную пленку.

3,5-Диаминобензойная кислота – известный мономер в двустадийном синтезе полиимидов [32–34]. Представляло интерес изучение возможности использования ДАБК одновременно в роли мономера и катализатора в одностадийном синтезе ПИ. Кроме того, синтез ПИ в таком растворителе как МП, позволит использовать полученный раствор непосредственно в изготовлении покрытия, без выделения и очистки полимера. Как видно из табл. 1, высокомолекулярный ПИ-6 с ($\eta_{\text{in}} = 1.3$ дл/г) синтезирован в среде МП в течение 5 ч без дополнительного катализатора. В то же время для сравнения на примере ПИ-2 показано, что в отсутствие катализатора высокомолекулярный полимер не образуется даже после 8 ч синтеза (табл. 1). По свойствам полученный в *N*-метил-2-пирролидоне ПИ-6 аналогичен полимеру, синтезированному в *m*-крезоле в присутствии катализатора.

Было установлено, что наличие у ПИ-5 боковых гидроксильных групп не обеспечивает необходимую адгезию покрытия к световоду, в то время как карбоксилсодержащий ПИ-6 формирует высокопрочное покрытие. В дальнейшем для термических испытаний световодов с покрытием на основе ПИ-5 использовали аппрет.

Замена анилинфлуорена в ПИ-6 на коммерчески более доступный 2-хлор-1,4-диаминобензол позволила получить в *N*-метил-2-пирролидоне ПИ-7 с сопоставимыми показателями тепло- и термостойкости. Соплимер растворяется в МП при комнатной температуре и формирует высокопрочные пленки с удовлетворительной адгезией к световоду (табл. 1 и 2).

В среде МП был синтезирован органорастворимый полиимид ПИ-8 на основе диангирида 3,3',4,4'-тетракарбоксифенилоксида и 3,5-диаминобензойной кислоты. ПИ-8 по термическим и другим физико-химическим свойствам является аналогом других карбоксилированных полиимидов (ПИ-6 и ПИ-7) и после выделения растворим при нагревании в МП.

Традиционный метод изготовления волоконных брэгговских решеток с помощью УФ-излучения подразумевает предварительное удаление полиимидной оболочки, поглощающей в данной области, и последующее ее восстановление. Создание ПИ покрытий световодов, обладающих оптической прозрачностью в ближней УФ-области существенно упростит технологию получения брэгговских решеток. На рис. 1 представлены кривые пропускания отлитых из синтезированных ПИ-пленок. Оптическое пропускание пленок из ПИ-1, ПИ-2, ПИ-3, ПИ-4, ПИ-5, ПИ-6 толщиной 20–30 мкм и ПИ-7 толщиной ≈ 100 мкм при длине волны 400 нм составляет 48, 40, 62, 67,

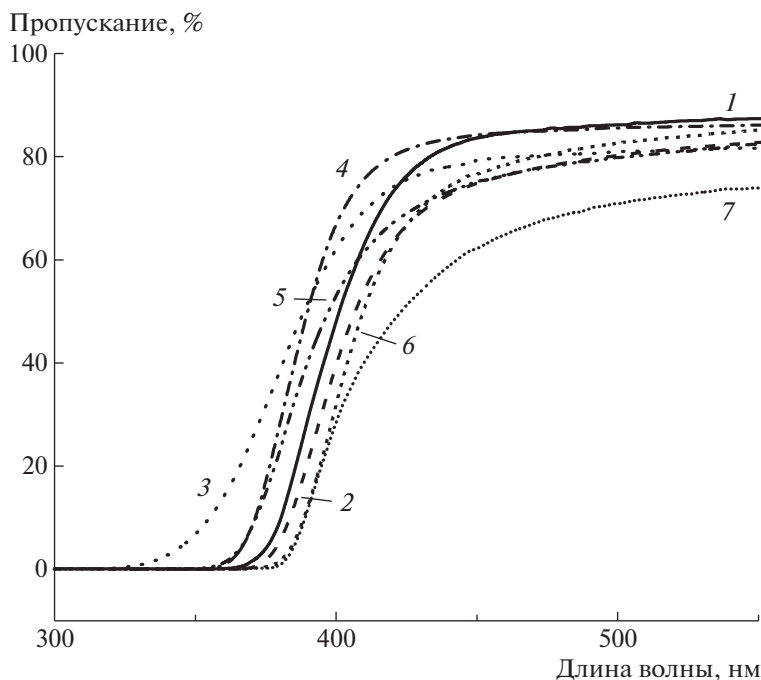


Рис. 1. Зависимость оптического пропускания пленок ПИ-1 (1), ПИ-2 (2), ПИ-3 (3), ПИ-4 (4), ПИ-5 (5), ПИ-6 (6), ПИ-7 (7) от длины волны.

53, 32 и 28% соответственно. Как видно, наибольшую оптическую прозрачность в ближней УФ-области проявляют пленки сополиимидов на основе диангида 2,2-бис-(3,4-дикарбоксибензил)-1,1,1,3,3,3-гексафторпропана и 9,9-бис-(*n*-аминофенил)флуорена с кремний- и хлорсодержащими сомономерами (ПИ-3 и ПИ-4 соответственно).

Полиимидные покрытия световодов

Полиимидные покрытия световодов используются для сохранения прочностных свойств последних при 300°C и выше. Традиционным способом оценки качества покрытия световода является метод двухточечного изгиба [35]. На рис. 2 приведены результаты измерения прочности световодов с новыми покрытиями на основе ПИ-3 и ПИ-4 в виде кривых Вейбулла до и после отжига при 300°C. Исходная прочность световода с покрытием из ПИ-3 составляет 5.1 ГПа. При выдержке при 300°C в течение 1 ч наблюдалось незначительное повышение прочности до 5.7 ГПа, что не удивительно и обусловлено удалением небольших остаточных количеств растворителя из покрытия. Более продолжительная термообработка приводит к появлению так называемого “лисьего хвоста”, когда прочность значительного числа образцов сохраняется прежней и падает только у одного—двух световодов (рис. 2а).

Световоды с покрытием на основе ПИ-4 изначально имели неоднородность по прочности, на

что указывает значительный угол наклона кривой на рис. 2б. После отжига разброс прочности световода стал еще более заметным.

Покрyтия из ПИ-1—ПИ-4 характеризуются невысокой адгезией к световоду, как и многие коммерческие аналоги, что приводит к необходимости добавления аппрета в раствор полимера перед его нанесением. Для улучшения адгезии покрытия в синтезе ПИ были использованы гидроксил- (ПИ-5) и карбоксилсодержащие (ПИ-6) сомомеры. Было установлено, что гидроксильные группы не обеспечивают необходимую адгезию покрытия к световоду, в то время как карбоксилсодержащий ПИ-6 формирует высокопрочное покрытие на поверхности световода, что позволило избежать добавления в раствор аппретирующего агента. Более того, была установлена возможность применения раствора ПИ-6 в МП непосредственно после его синтеза. Аналогично в среде МП был получен и использован раствор ПИ-7.

Из представленных на рис. 3 результатов можно выделить две группы световодов с новыми разработанными полиимидными покрытиями. К первой группе относятся световоды с покрытиями из ПИ-1, ПИ-2 и ПИ-5, прочность которых снижается на 16, 6 и 32% соответственно уже после 1 ч выдержки при 300°C. При увеличении продолжительности отжига до 24 ч прочность световодов уменьшается в еще большей степени. При этом световод с покрытием на основе ПИ-2 сохраняет около 83% от исходного значения.

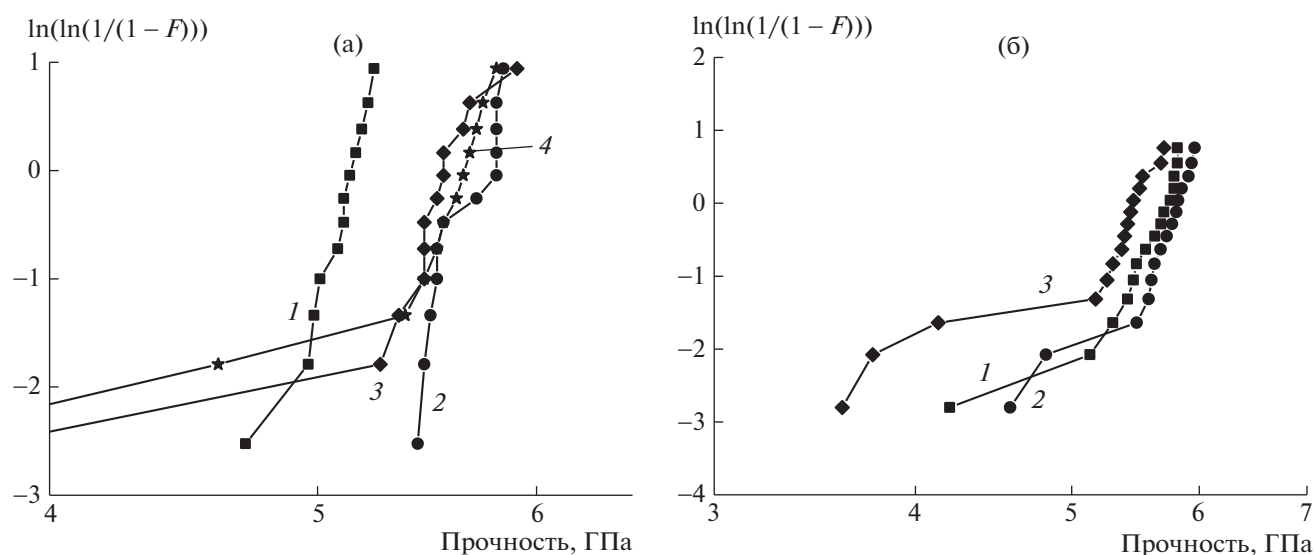


Рис. 2. Результаты измерений прочности образцов световодов с покрытиями из ПИ-3 (а) и ПИ-4 (б) до (1) и после отжига в течение 1 (2), 24 (3) и 72 ч (4) при 300°C, представленные в виде функции Вейбулла (F – накопленная вероятность разрушения световода).

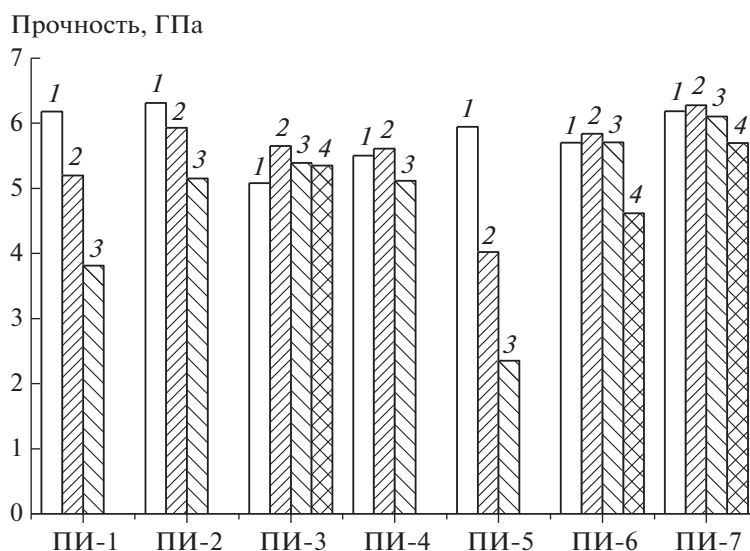


Рис. 3. Прочность образцов световодов с покрытиями из ПИ-1–ПИ-7 до (1) и после отжига в течение 1 (2), 24 (3) и 72 ч (4) при 300°C.

Вторую группу образуют световоды с покрытиями из ПИ-3, ПИ-4, ПИ-6 и ПИ-7, прочность которых остается неизменной или возрастает после 1 ч отжига при 300°C (рис. 3). Термообработка при данной температуре в течение 24 ч вызывает уменьшение прочности световода с покрытием из фтор- и хлорсодержащего ПИ-4. Следует отметить, что наибольшую термостабильность проявляют покрытия на основе кремнийсодержащего ПИ-3 и карбоксилированного ПИ-7. Прочность

таких световодов практически не снижается после 3 суток выдержки при 300°C.

Одно из важных требований к покрытию световода – инертность к влаге. Проведенные исследования продемонстрировали устойчивость разработанных покрытий к воздействию воды на протяжении 3 суток. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты испытаний световода с покрытием из ПИ-6. Для сравнения коммерческий световод фирмы “Сeram Optec” (Латвия) теряет около 15% прочности уже после 24 ч выдерж-

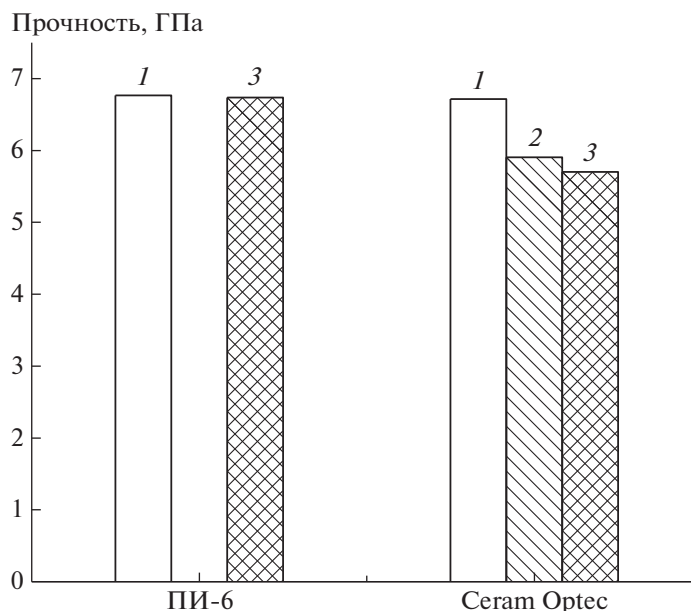


Рис. 4. Результаты измерений прочности световода с покрытием из ПИ-6 и коммерческого световода фирмы “Ceram Optec” с ПИ-покрытием до (1) и после выдержки в течение 24 (2) и 72 ч (3) в воде.

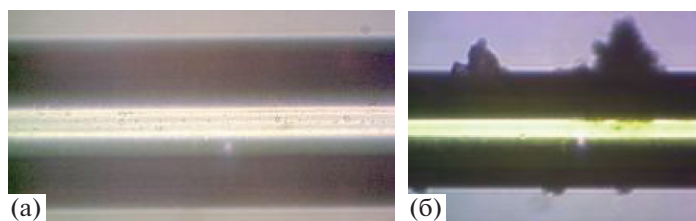


Рис. 5. Фотографии световодов с покрытием из ПИ-6 (а) и коммерческого световода фирмы “Ceram Optec” с ПИ-покрытием (б) после выдержки в течение 72 ч в воде.

ки. Как видно на рис. 5, в отличие от разработанных покрытий коммерческий продукт частично разрушается после испытаний на гидролитическую стабильность. Это наблюдение, вероятнее всего, является следствием незначительной имидизации полиаминокислоты, применяемой для изготовления коммерческого ПИ-покрытия.

Авторы выражают благодарность Е.Л. Вулаху за предоставленные хлорированные мономеры, М.И. Бузину за термогравиметрические испытания полимеров, Е.Н. Афанасьеву за термомеханические испытания полимеров и Е.М. Чайке за механические испытания пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-29-17035 МК). Исследования свойств полимеров были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abadie M.* High Performance Polymers-Polyimides Based: From Chemistry to Applications. Rijeka: In-Tech, 2012.
2. *Scola D.A.* Pat. 4056651 USA. 1977.
3. *Dikshit A.K.* // Int. J. Plastics Technol. 2016. V. 20. № 2. P. 401.
4. *Stolov A.A., Slyman B.E., Simoff D.A., Hokansson A.S., Allen R.S., Earnhardt J.P.* // Int. Soc. Optics Photonics. 2012. P. 82150B.
5. *Choi M.-C., Kim Y., Ha C.-S.* // Progr. Polym. Sci. 2008. V. 33. № 6. P. 581.
6. *Hasegawa M.* // Polymers (Basel). 2017. V. 9. № 10.
7. *Liu J.-G., Ni H.-J., Wang Z.-H., Yang S.-Y., Zhou W.-F.* // Optoelectronics, Materials and Devices, 2015. P. 57.
8. *Ni H.-J., Liu J.-G., Wang Z.-H., Yang S.-Y.* // J. Industr. Eng.Chem. 2015. V. 28. P. 16.
9. *Sanaeepur H., Ebadi Amooghini A., Bandehali S., Moghadassi A., Matsuura T., Van der Bruggen B.* // Progr. Polym. Sci. 2019. V. 91. P. 80.

10. *Sroog C.* Polyimides // *Progr. Polym.Sci.* 1991. V. 16. № 4. P. 561.
11. *Liaw D.-J., Wang K.-L., Huang Y.-C., Lee K.-R., Lai J.-Y., Ha C.-S.* // *Progr. Polym.Sci.* 2012. V. 37. № 7. P. 907.
12. *Sazanov Y.N.* // *Russ. J. Appl. Chem.* 2001. V. 74. № 8. P. 1253–1269.
13. *Korshak V.V., Vinogradova S.V., Vygodskii Y.S.* *Cardo Polymers* // *J. Macromol. Sci. C.* 1974. V. 11. № 1. P. 45.
14. *Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Vygodskii Y.S.* // *Russ. Chem. Revs.* 1996. V. 65. № 3. P. 249.
15. *Dhara M.G., Banerjee S.* // *Progr. Polym. Sci.* 2010. V. 35. № 8. P. 1022.
16. *Zhuang Y., Seong J.G., Lee Y.M.* // *Progr. Polym. Sci.* 2019. V. 92. P. 35.
17. *Yi L., Huang W., Yan D.* // *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* 2017. V. 55. № 4. P. 533.
18. *Kosolapov A., Plastinin E., Semjonov S., Bayminov B., Sapozhnikov D., Alekseeva D., Vygodskii Y.S.* // *Bull. Lebedev Physics Institute.* 2017. V. 44. № 6. P. 159.
19. *Sapozhnikov D.A., Bayminov B.A., Zabegaeva O.N., Alexeeva D.D., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Plastinin E.A., Buzin M.I., Vygodskii Y.S.* // *High Performance Polymers.* 2017. V. 29. № 6. P. 663.
20. *Semjonov S., Sapozhnikov D.A., Erin D.Y., Zabegaeva O.N., Kushtavkina I.A., Nishchev K.N., Vygodskii Y.S., Dianov E.M.* // *Quantum Electronics.* 2015. V. 45. № 4. P. 330.
21. *Sapozhnikov D.A., Bayminov B.A., Popova N.A., Zabegaeva O.N., Alekseyeva D.D., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Plastinin E.A., Vygodskii Y.S.* // *Macromol. Symp.* 2017. P. 1700028.
22. *Stolov A.A., Simoff D.A., Li J.* // *J. Lightwave Technol.* 2008. V. 26. № 20. P. 3443.
23. *Overton B.J., Gooijer F., Krabshuis G.* // *Proc. 61 Int. Wire and Cable Symp. "An Optical Fiber with Advanced Polyimide Coating"*. Rhode Island, USA, 2012. P. 321.
24. *Chen Y., Iroh J.O.* // *Chem. Mater.* 1999. V. 11. № 5. P. 1218.
25. *Choi M.C., Hwang J.C., Kim C., Ando S., Ha C.S.* // *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* 2010. V. 48. № 8. P. 1806.
26. *Choi M.-C., Wakita J., Ha C.-S., Ando S.* // *Macromolecules.* 2009. V. 42. № 14. P. 5112.
27. *Han K., You K., Jang W.H., Rhee T.H.* // *Macromol. Chem. Phys.* 2000. V. 201. № 6. P. 747.
28. *Li L., Xu Y., Che J., Su X., Song C., Xiuping M.* // *Macromol. Res.* 2017. V. 25. № 11. P. 1076.
29. *Othman M.B.H., Ramli M.R., Tyng L.Y., Ahmad Z., Akil H.M.* // *Materials Design.* 2011. V. 32. № 6. P. 3173.
30. *Tsai M.-H., Chiang P.-C., Whang W.-T., Ko C.-J., Huang S.-L.* // *Surf. Coat. Technol.* 2006. V. 200. № 10. P. 3297.
31. *Oktay B., Toker R.D., Kayaman-Apohan N.* // *Polym. Bull.* 2015. V. 72. № 11. P. 2831.
32. *Hamciuc E., Hamciuc C., Ronova I.A.* / *Rev. Roum. Chim.* 2012. V. 57. № 4–5. P. 407.
33. *Wang D.H., McKenzie R.N., Buskohl P.R., Vaia R.A., Tan L.-S.* // *Macromolecules.* 2016. V. 49. № 9. P. 3286.
34. *Wind J.D., Staudt-Bickel C., Paul D.R., Koros W.J.* // *Macromolecules.* 2003. V. 36. № 6. P. 1882.
35. *Matthewson M.J., Kurkjian C.R., Gulati S.T.* // *J. Am. Ceram. Soc.* 1986. V. 69. № 11. P. 815.