

Изучение стойкости к многократному изгибу высокомодульных полимерных пленочных материалов

Study of the resistance to repeated bending of high-modulus polymer film materials

О.И. АБРАМУШКИНА¹, О.И. ЧАЙКОВ², В.А. ЛОМОВСКОЙ³

O.I. ABRAMUSHKINA¹, O.I. CHAIKOV², V.A. LOMOVSKOY³

¹ АО «МИПП-НПО «Пластик», Москва, Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

³ ИФХЭ РАН, Москва, Россия

¹ JSC MIPP-NPO Plastik, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

³ The Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS), Moscow, Russia

abramushkina@mail.ru

Работа посвящена изучению стойкости высокомодульных полимерных пленок к многократному изгибу. Критерием стойкости к деформационным нагрузкам был выбран коэффициент сохранения прочности при испытании пленок на растяжение после многократного изгиба при постоянном числе циклов приложения нагрузки, в том числе, при изменении угла изгиба и приложенной при изгибе нагрузки. Показано, что существенное влияние на изменение деформационно-прочностных показателей пленок оказывает угол изгиба и приложенная нагрузка. Наиболее стойкими к многократному изгибу оказались пленки двухосноориентированного ПЭТ (БОПЭТ). Аморфные пленки АПЭТ и PET-GAG показали низкую стойкость к изгибу и разрушались хрупко в выбранных условиях. Сравнение стойкости к изгибу пленок общего назначения и оригинальных мембран барабанов показало незначительное снижение прочностных свойств после изгиба последних. Неориентированные пленки из ПА6 показали существенное падение деформационно-прочностных свойств, а комбинированный материал из двухосноориентированной пленки из ПА6 с капроновой тканью показал незначительное снижение свойств после изгиба.

Ключевые слова: пленки на основе ПЭТ, БОПЭТ, пленки из ПА6, барабанные мембраны, стойкость к многократному изгибу, механические динамические испытания

The resistance of high-modulus polymer films to repeated bending has been studied. The coefficient of strength retention during tensile testing of films after repeated bending with a constant number of load application cycles, including when changing the bending angle and the load applied during bending, was chosen as a criterion for resistance to deformation loads. It is shown that the bending angle and the applied load have a significant effect on the change in the deformation and strength properties of films. Biaxially oriented PET (BOPET) films were found to be the most resistant to repeated bending. Amorphous APET and PET-GAG films demonstrated low bending resistance and were brittle in the selected conditions. A comparison of the resistance to repeated bending of general-purpose films and original drum membranes showed a slight decrease in strength properties. Non-oriented PA6 films showed a significant drop in deformation-strength properties, and a combined material of biaxially oriented PA6 film with nylon fabric showed a slight decrease in properties after bending.

Keywords: PET-based films, BOPET, PA6 films, drum membranes, resistance to repeated bending, mechanical dynamic tests

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-4-9

Введение

Полимерные пленочные материалы в настоящее время широко используются во многих областях. Наиболее широко они используются в производстве тары и упаковки, как в виде моно-, так и многослойных материалов или ламинатов на их основе, а также в технических областях: в электронике, электротехнике и др. Кроме того, пленочные материалы применяют в производстве комбинированных ткане-пленочных материалов в авиационной и космической отраслях.

Требования к материалам, используемым в технических областях, обычно включают высокие механические характеристики, стойкость к химреагентам, стойкость к знакопеременным нагрузкам в широком температурном интервале, низкую усадку и низкую ползучесть. Одним из способов повышения механических показателей является метод одно- или двухосной ориентации. Известно [1], что ориентация материалов из кристаллизующихся полимеров приводит к существенному повышению прочности при растяжении и модуля упругости. Примерами являются двухосноориентированные пленки из полипропилена (БОПП), полиэтилентерефталата (БОПЭТ), полиамида (БОПА). Что касается пле-

ночных материалов из аморфных полимеров, например, двухосноориентированные ПС пленки (БОПС), то, как правило, значимым результатом ориентации является повышение ударостойкости и некоторое повышение теплостойкости таких пленок.

Одной из характеристик, важных при эксплуатации пленок, является их стойкость к многократному изгибу. В частности, такие свойства требуются, например, в гибких дисплеях на гибких пленочных подложках [2].

Специфической областью применения высокопрочных пленочных материалов является производство мембран для ударных музыкальных инструментов. Особенностью мембран в барабанах является минимальная толщина, жесткость и стойкость к ударным нагрузкам. Важным элементом при эксплуатации барабанных мембран является усилие натяга мембраны.

Одним из важных факторов при эксплуатации мембран барабанов является то, как часто барабан необходимо перенастраивать, т. е. «рабочий ресурс» мембраны. С увеличением продолжительности использования пленка мембраны деформируется и провисает, теряет прочность, соответственно, ухудшаются акустические свойства. Поэтому выбор изучаемых материалов был обусловлен также

Таблица 1. Характеристика объектов исследования.

№ п/п	Сокращенное обозначение материала пленок	Производитель	Толщина, мкм	ГОСТ, ТУ	E_p^* , МПа
1	БОПЭТ	ООО «Флекс Филмс Рус», Uflex Group (Индия)	170–180	–	–
2	БОПЭТ-Э	ПАО «ВХЗ»	170–180	ГОСТ 24234–80	3500–4000
3	А-ПЭТ	АО СП «АМИПАК»	130–140	ТУ РБ 00916408.002–94	2500–2600
4	PET GAG Polylux	Германия	150–160	–	2000
5	ПВХ марки П-73ЭМ	ООО «Клекнер Пентапласт Рус»	285	ГОСТ 25250–2023	3000–4000
6	ПА-6	ООО ТД «ФПК» (Екатеринбург)	75–80	ТУ 2255-008-00203430–2008	1500–1600
7	Мембрана BRAHNER BD-14	BRAHNER, Китай	177	–	–
8	Мембрана REMO Ambassador coated 14	Remo Inc., США	254	–	–
9	ПА 6 – ткань**	МИПП НПО «Пластик» (Москва)	165	ТУ 6-19-051-272–80	1700–2500

* справочные данные модуля упругости при растяжении

** комбинированный материал: двухосноориентированная полиамидная пленка БОПА –полиамидный лак– капроновая ткань. Модуль упругости приведен для пленки БОПА.

таким показателем, как ползучесть, являющаяся одной из важных характеристик при эксплуатации [3].

До 60-х годов прошлого столетия барабанные мембраны изготавливали из кожи животных. Замена кожи пластиком связана с возможной эксплуатацией барабанов в разных климатических условиях, при различной влажности и температуре окружающей среды. В отличие от пластика, натуральная кожа намного быстрее теряет свои свойства при воздействии климатических факторов [4, 5]. В современных ударных музыкальных инструментах в качестве полимерных мембран применяют БОПЭТ пленки. Они обладают высокой прочностью, размерной стабильностью, газо- и влагонепроницаемостью, что немаловажно при эксплуатации в условиях влажного климата [4]. Пленка БОПЭТ в производстве мембран для изготовления банджо и барабанов используется с 1958 года из-за ее прочности и акустических свойств при натяжении на опорный край барабана.

Целью настоящей работы явилось изучение работоспособности полимерных высокомодульных пленок в условиях многократного изгиба, применяемых в ударных музыкальных инструментах.

Экспериментальная часть

На основании литературных источников [3, 5] был выбран ряд высокомодульных полимерных пленок, а также условия проведения сравнительных испытаний для определения пригодности материалов для данного применения. В ряде источников [6–9] описаны условия эксплуатации и химическая природа полимерных пленок, используемых в настоящее время для концертных барабанов определенного диаметра, а также диапазон толщин пленок, применяемых в качестве мембран барабанов.

Выбор объектов исследования проводили на основе анализа требований к механическим характеристикам пленок: модуль упругости при растяжении (более 1,3 ГПа), прочность при разрыве (более 40 МПа), диапазон толщин пленок для указанного применения (от 51 до 610 мкм) [7, 10], а также стойкости к влаге и стабильности при изменении температуры. Кроме того, выбор ограничивался доступным (по толщине) ассортиментом производимых в промышленности высокомодульных пленок.

В табл. 1 перечислены объекты исследования и нормативно-техническая документация, по которой они производятся.

Основным критерием стойкости материала к многократному изгибу и пригодности для конкретного применения были выбраны коэффициенты сохранения прочности и относительного удлинения при разрыве пленок после испытания на многократный изгиб. Сравнительную оценку стойкости пленок к ударным нагрузкам проводили опосредованно как отношение площадей под кривыми нагрузка–удлинение. Кроме того, для сравнения были испытаны образцы оригинальных мембран.

Испытания пленок на растяжение проводили по ГОСТ 14236–81 на разрывной машине СМАРТЕСТ ST U1010 (Россия, ООО «Интелтест»), скорость перемещения зажима составляла 100 мм/мин. Образцы в форме полос длиной 175 мм, шириной $15 \pm 0,2$ мм. Параллельно испытывали не менее пяти образцов.

Идентификацию состава полимерного материала оригинальных мембран проводили методом ДСК по ГОСТ Р 56724–2015 на

приборе NETZSCH DSC 214 Polyma (NETZSCH–Gerätebau GmbH, Германия).

Таблица 2. Деформационно-прочностные свойства исходных пленок.

Обозначение материала	Направление изготовления образца	σ_{pp} , МПа	ϵ_{pp} , %	Поведение при растяжении
БОПЭТ	вдоль	165	190	При растяжении образцов образовывалась шейка, рабочая область образцов белела при растяжении
	поперек	170	130	
БОПЭТ-Э	вдоль	192	145	При растяжении образцов происходило хрупко
	поперек	188	143	
АПЭТ	вдоль	71	5	Разрушение образцов происходило хрупко
PET- GAG	вдоль	72	6	Разрушение образцов происходило хрупко
нПВХ	вдоль	49	3	Разрушение образцов происходило хрупко
ПА-6	вдоль	69	302	При растяжении образцов образовывалась шейка
BRAHNER (мембрана)	вдоль	146	112	При растяжении образцов образовывалась шейка, после разрыва образовывались края с зазубринами
	поперек	161	78	
REMO (мембрана)	вдоль	135	83	При растяжении образцов образовывалась шейка, рабочая область образцов белела при растяжении
	поперек	148	93	
ПА6-ткань	вдоль	114	41	Наблюдалось сужение образцов в рабочей области без выраженной шейки. Некоторые образцы расслаивались

Для изучения стойкости материалов к многократным изгибающим нагрузкам использовали прибор DP–5/3 (VEB Werkstoffprüfmaschinen, Германия). Выбор условий испытания осуществляли, исходя из условий деформации мембран при воспроизведении звука. Испытания проводили при постоянном угле изгиба 60 градусов, для ряда пленок для определения влияния угла изгиба на деформационно-прочностные показатели угол изгиба меняли от 20 до 180 градусов. Изгибающую нагрузку варьировали в диапазоне от 0 до 2200 г, при этом максимальная нагрузка примерно соответствовала нагрузке при натяжении барабанной мембраны [10–13]. Число циклов сравнительных испытаний оставалось постоянным – 15000 циклов. Такой выбор объяснялся ориентировочным максимальным числом циклов при воздействии

на барабанную мембрану в течение одного рок-концерта и временными затратами на эксперимент.

Скорость приложения циклической нагрузки – 100 циклов в минуту. Для каждого типа пленок испытывали не менее пяти образцов.

Оценку механических динамических свойств образцов пленок в широком диапазоне температур проводили по методу свободных затухающих крутильных колебаний по ГОСТ 20812–83 на вертикальном крутильном маятнике в интервале температур минус 150 – плюс 200°C на образцах размером 65×5 мм. Схема прибора и его характеристики приведены в [14].

Результаты испытания на растяжение образцов исходных пленок вдоль и поперек направления экструзии или каландрования (для пленки из НПВХ) представлены в табл. 2. Проведена статистическая обработка результатов, все отклонения значений показателей от средних составляли не более 10% от среднего значения.

Сравнение показателей изучаемых пленок БОПЭТ и барабанных мембран показывает, что прочность при разрыве и относительное удлинение в образцах мембран несколько ниже, чем в образцах БОПЭТ пленок, что может свидетельствовать о более высокой ориентации макромолекул, или отличии молекулярной массы, или состава полиэтилентерефталата в БОПЭТ пленках.

Образцы неориентированных пленок АПЭТ, РЕТ- GAG, НПВХ разрушались хрупко, что свидетельствует о низкой стойкости как к растягивающим, так и к ударным нагрузкам. Это делает такие материалы непригодными для применения в ударных инструментах. Что касается пленки из ПА-6, то у этого материала есть потенциальная возможность применения: высокая прочность и относительное удлинение образцов говорят о механической прочности и стойкости, в том числе к ударным нагрузкам. На рис. 1 представлены типичные диаграммы растяжения образцов аморфных пленок ПЭТ.

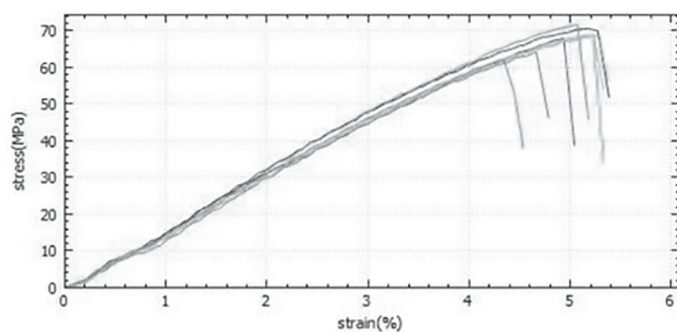


Рис. 1. Типичные диаграммы растяжения для пленок АПЭТ и ПЭТ-GAG.

Диаграммы растяжения ориентированных пленок БОПЭТ имели другой вид: на диаграммах проявляется предел текучести, после чего образуется шейка и образец растягивается с возрастанием напряжения до разрыва образцов. Типичные диаграммы растяжения образцов БОПЭТ и БОПЭТ-Э представлены на рис. 2.

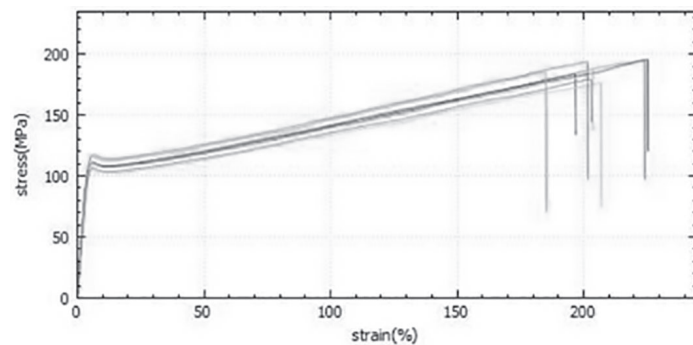


Рис. 2. Типичные диаграммы растяжения для пленок БОПЭТ, БОПЭТ-Э, мембран BRAHNER и REMO.

Стойкость к многократному изгибу определяли при постоянном угле изгиба 60 градусов и нагрузке 2200 г, что для пленок разной толщины соответствовало приложенному напряжению от 6 до 18 МПа.

Оценку стойкости пленочных образцов к многократному изгибу (не менее 15000 циклов) проводили по коэффициентам сохранения прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве (в направлении экструзии) после испытаний на изгиб.

Коэффициент сохранения прочности рассчитывали как:

$$K_{\sigma} = (\sigma_{\text{после изгиба}} / \sigma_{\text{исх}}) \quad (1)$$

Коэффициент сохранения относительного удлинения при разрыве рассчитывали как:

$$K_{\epsilon} = (\epsilon_{\text{после изгиба}} / \epsilon_{\text{исх}}) \quad (2)$$

Образцы пленок, не разрушившихся после 15000 циклов изгиба, были испытаны на растяжение в направлении экструзии.

Результаты испытаний пленок НПВХ по оценке изменения деформационно-прочностных показателей после многократного изгиба не приводятся, так как они выдержали менее 15000 циклов (от 500 до 800).

Коэффициенты сохранения прочности пленок в направлении экструзии после 15000 циклов изгиба представлены на рис. 3, а относительного удлинения при разрыве – на рис. 4.

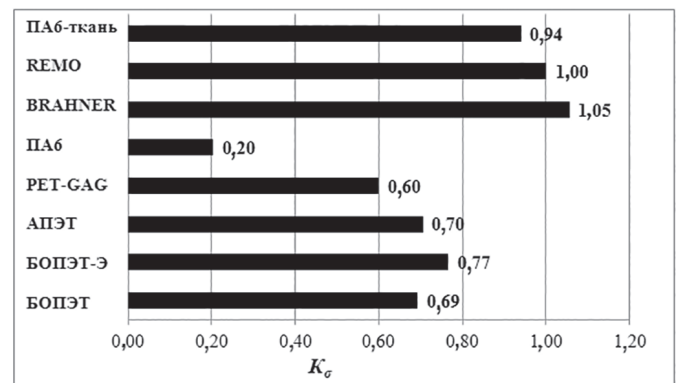


Рис. 3. Коэффициент сохранения прочности при растяжении образцов после испытания на многократный изгиб.

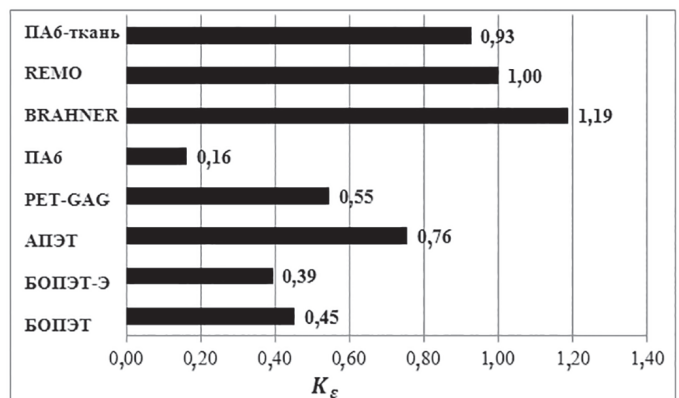


Рис. 4. Коэффициент сохранения относительного удлинения при разрыве образцов после испытания на многократный изгиб.

Из полученных данных видно, что после многократного изгиба в выбранных условиях прочность образцов при разрыве существенно снижается для всех изученных пленок на основе ПЭТ, за исключением образцов из оригинальных мембран.

Прочность пленки из ПА-6 снижается в большей степени по сравнению с ПЭТ пленками, в то же время прочность комбинированного материала ПА6-ткань изменилась несущественно после многократного изгиба.

Относительное удлинение также снижалось для всех видов пленок на основе ПЭТ, за исключением АПЭТ пленки. Пленка АПЭТ при растяжении показывает ступенчатое изменение нагрузки и существенное увеличение относительного удлинения при разрыве по сравнению с исходной пленкой. Вероятно, в результате изменения структуры материала пленки в зоне изгиба проявляется вынужденная эластичность, что приводит к росту удлинения. На рис. 5 представлена диаграмма «напряжение – удлинение» и фото такой структуры.

Неожиданные данные получены для образцов мембран на основе ориентированных ПЭТ пленок. Показано, что если для мембраны REMO прочность и относительное удлинение после испытания на изгиб практически не изменились, то для мембраны BRAHNER эти показатели незначительно возросли. Изучение состава образцов мембран методами ДСК не показало наличия в их составе

каких-либо добавок. Однако известно, что при производстве ПЭТ использование сомономеров влияет на свойства как сырья, так и БОПЭТ пленок, получаемых из него [3]. Вероятно, изготовители мембран для музыкальных барабанов обладают своим «ноу-хау» состава пленок, повышающих ресурс работы мембран. Для выявления различия состава пленок требуется применение более сложных комплексных методик.

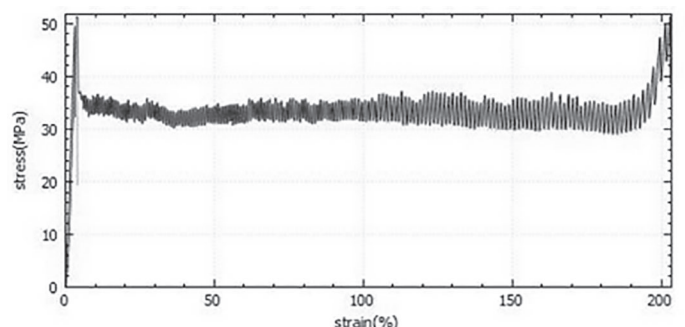


Рис. 5. Типичная кривая растяжения пленки АПЭТ и «полосатая» структура пленки после испытания на многократный изгиб.

Выбранные нами условия испытания на изгиб были достаточно жесткими. В реальных условиях угол изгиба мембраны не превышает 20–30 градусов, а нагрузка при натяжении мембран распространяется на всю площадь мембраны. Влияние угла при изгибе на показатели при растяжении пленок было оценено на образцах пленок АПЭТ и ПА-6. Для пленок БОПЭТ определяли влияние на свойства образцов после испытаний не только угла, но и нагрузки при изгибе и числа циклов приложения нагрузки.

Влияние угла изгиба на прочность и относительное удлинение при разрыве образцов пленки АПЭТ (вдоль экструзии) представлено на рис. 6.

Показано, что снижение прочности при увеличении угла изгиба для пленок АПЭТ составило 25%, а повышение относительного удлинения при угле изгиба 40 градусов и выше – почти в 30 раз. При этом при растяжении образцов образовывалась «полосатая» структура, представленная на рис. 5, что, вероятно, связано с созданием в месте перегиба узкой области, инициирующей ориентацию образца, волнообразно распространяющейся по длине образца в направлении, поперечном растяжению. Это явление может быть связано с возникновением в области перегиба структуры материала, способствующей ориентации макромолекул и кристаллизации ориентированных областей [3].

Напротив, для пленок из ПА-6 при увеличении угла изгиба наблюдали резкое падение деформационно-прочностных характеристик, что, вероятно, объясняется развитием дефектной структуры в области перегиба и снижением межмолекулярного взаимодействия.

При изучении свойств БОПЭТ пленок при многократном изгибе изменяли не только угол и нагрузку при изгибе, но и число циклов испытания. Деформационно-прочностные характеристики образцов БОПЭТ пленки в зависимости от числа циклов изгиба представлены на рис. 7.

Таблица 3. Коэффициент ударостойкости пленок после испытания на многократный изгиб.

Наименование показателя	Наименование пленки							
	БОПЭТ	БОПЭТ-Э	АПЭТ	PET-GAG	ПА6	BRAHNER	REMO	ПА6-ткань
$B_{исх}^* = S_{исх} / S_{АПЭТ\text{ исх}}$	90,1	80,0	1,0	1,1	59,9	47,0	32,2	13,4
$B_a^{**} = S_{изг} / S_{исх}$	0,31	0,30	8,28	0,29	0,03	1,15	1,00	0,87

* $B_{исх}$ – это отношение площади под кривой «нагрузка–удлинение» исходных испытуемых пленок к площади под кривой «нагрузка–удлинение» пленки АПЭТ исх.

** Коэффициент изменения ударостойкости $B_a = S_{изг} / S_{исх}$, где $S_{изг}$ – площадь под кривой «нагрузка – удлинение» после испытания пленок на изгиб, $S_{исх}$ – площадь под кривой для исходных образцов.

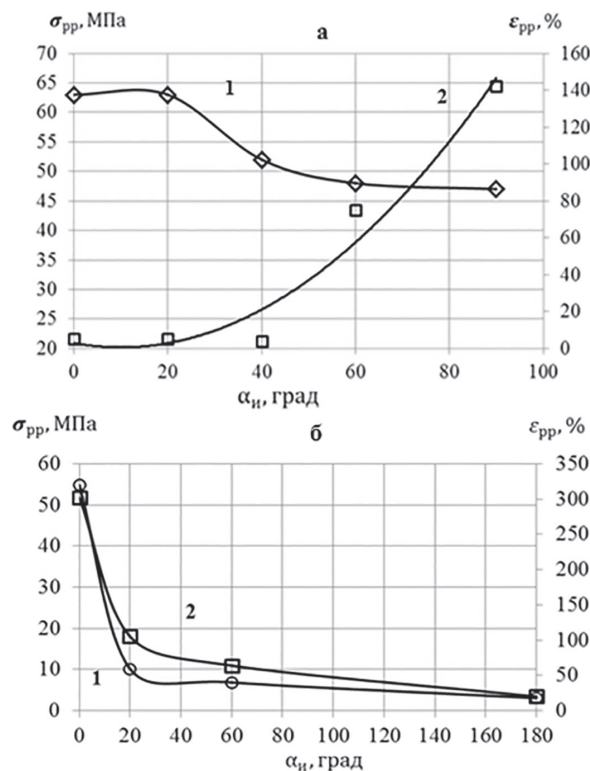


Рис. 6. Влияние угла изгиба на прочность (1) и относительное удлинение (2) при разрыве образцов пленок АПЭТ (а) и ПА-6 (б) после многократного изгиба (15000 циклов и нагрузка 2200 г).

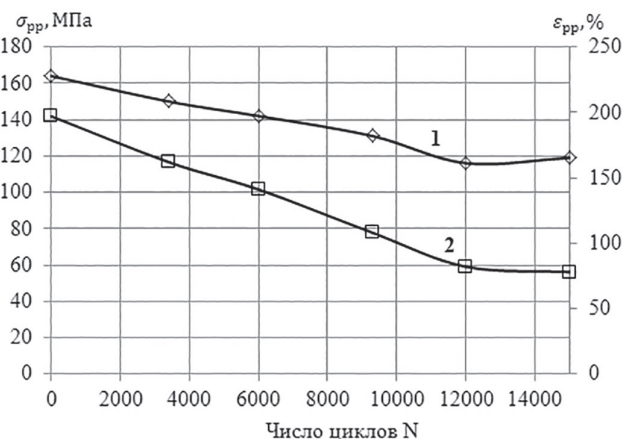


Рис. 7. Зависимость прочности (1) и относительного удлинения (2) при разрыве пленок БОПЭТ после многократного изгиба при нагрузке 2200 г и угле изгиба 60 градусов.

С увеличением числа циклов изгиба прочность и относительное удлинение при разрыве снижаются постепенно с увеличением числа циклов испытания.

Изучение влияния угла изгиба и нагрузки на показатели БОПЭТ пленок при растяжении представляло наибольший интерес в силу возможных изменений этих параметров в процессе эксплуатации.

На рис. 8 представлены зависимости деформационно-прочностных свойств пленки БОПЭТ при растяжении от угла изгиба и приложенной при испытании на многократный изгиб нагрузки.

Следует отметить, что при малых углах изгиба характеристики пленки мало изменялись вплоть до достижения угла более сорока градусов. Дальнейшее увеличение угла изгиба приводило к резкому снижению прочности и относительного удлинения при

разрыве. Вероятно, процессы релаксации напряжений в этом случае не приводили к восстановлению структуры пленок.

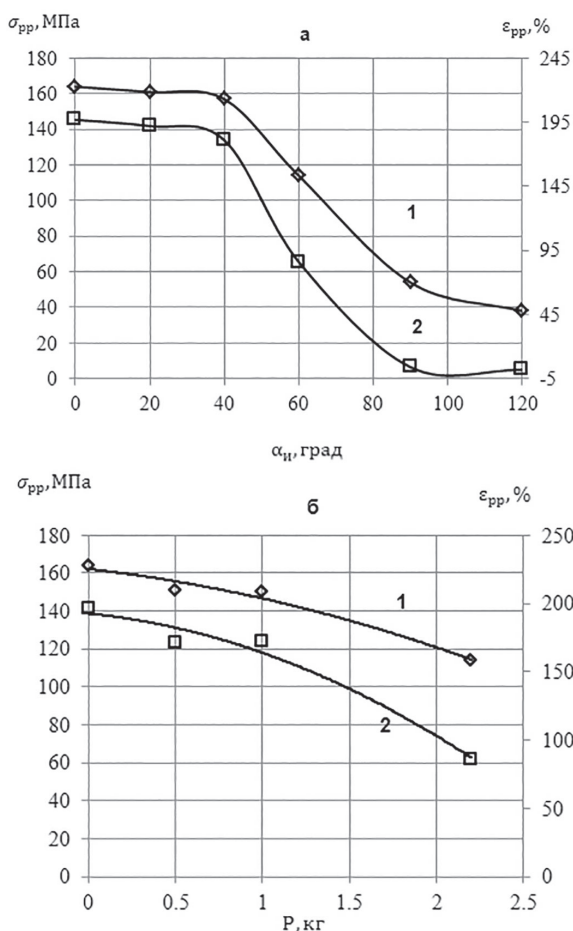


Рис. 8. Зависимость прочности (1) и относительного удлинения (2) при разрыве пленок БОПЭТ после многократного изгиба 15000 циклов от угла изгиба при постоянной нагрузке 2200 г (а) и от изгибающей нагрузки (б) при постоянном угле изгиба 60 градусов.

Как следует из рис. 8б, повышение растягивающей нагрузки при постоянстве угла изгиба оказывает существенное влияние на прочность и относительное удлинение при разрыве образцов.

Поскольку мембраны в процессе эксплуатации испытывают не только растягивающие, но и ударные нагрузки, а изменение ударной вязкости пленочных материалов после испытания на многократный изгиб оценить не представлялось возможным, поэтому оценивали стойкость к удару по изменению площади под кривой «нагрузка–удлинение» [16] для исходных пленок $S_{исх}$ и после испытания пленок на изгиб $S_{изг}$.

В табл. 3 приведены значения коэффициента ударостойкости $B_{исх}$, оцениваемого как отношение площади под кривой «нагрузка – удлинение» для исходных пленок ($S_{исх}$) к наименьшему значению $S_{АПЭТ\text{ исх}}$ для пленки АПЭТ, принятой за базу, а также коэффициент изменения ударостойкости B_a , рассчитываемого как отношение площади под кривой «нагрузка–удлинение» для пленок, подвергнутых изгибу ($S_{изг}$), к наименьшему значению $S_{АПЭТ\text{ исх}}$.

Из таблицы видно, что для исходных пленок низкие значения ударостойкости имеют неориентированные АПЭТ-пленки и пленки PET-GAG (хрупкое разрушение). Оценка изменения ударостойкости пленочных материалов показала, что снижение ударостойкости после многократного изгиба наиболее существенно для пленок БОПЭТ, БОПЭТ-Э, PET-GAG и ПА6. Наблюдается незначительное уменьшение ударостойкости комбинированной пленки ПА6-ткань и некоторое повышение для пленок оригинальных мембран BRAHNER и REMO. Для пленки АПЭТ в выбранных условиях испытания наблюдали значительное повышение ударостойкости в результате изменения структуры пленки, о чем упоминалось выше.

Различное поведение образцов материалов БОПЭТ после испытаний на многократный изгиб привело к необходимости идентификации материала оригинальных мембран.

Для идентификации материала оригинальных мембран провели испытания методом ДСК, которые подтвердили, что мембраны изготовлены из полиэтилентерефталата (ПЭТ). На рис. 9 представлена термограмма ДСК.

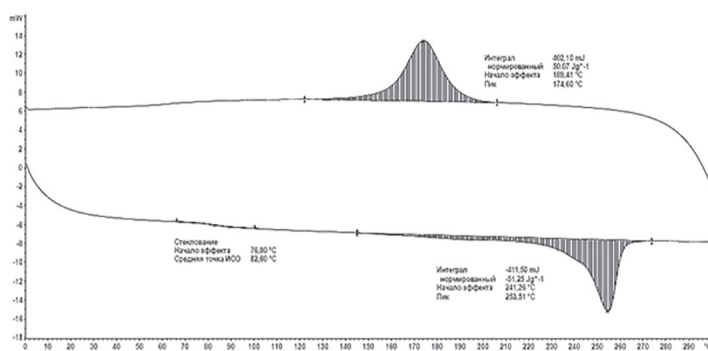


Рис. 9. ДСК термограмма образца мембраны BRAHNER.

На термограмме в области температур выше 76–85 °C наблюдается начало релаксационного перехода процесса расстекловывания полимера, а в области 240–265 °C – плавление кристаллитов. Такие температурные переходы характерны для термофиксированного ориентированного ПЭТ.

В табл. 4 представлены результаты испытания мембран методом ДСК.

Таблица 4. Результаты испытаний мембран методом ДСК.

Показатель	Мембрана	
	BRAHNER	REMO
Температура стеклования, °C	83	84
Температура плавления, °C	254	252
Температура кристаллизации, °C	175	166
*Степень кристалличности, %	34,8	36,6

* Теплота плавления 100% кристаллического ПЭТ составляет 140,0 кДж/кг [15]

Характеристики свойств пленочных материалов на основе БОПЭТ в широком диапазоне температур определяли методом свободных затухающих крутильных колебаний.

Декремент затухания рассчитывали по уравнению 1 (ГОСТ 20812-83):

$$D = \frac{1}{N-1} \cdot \ln \frac{A_1}{A_N},$$

где N – число колебаний, A_1 – амплитуда первого колебания, м; A_N – амплитуда N колебания, м.

Вид кривых изменения декремента затухания от температуры приведен на рис. 10.

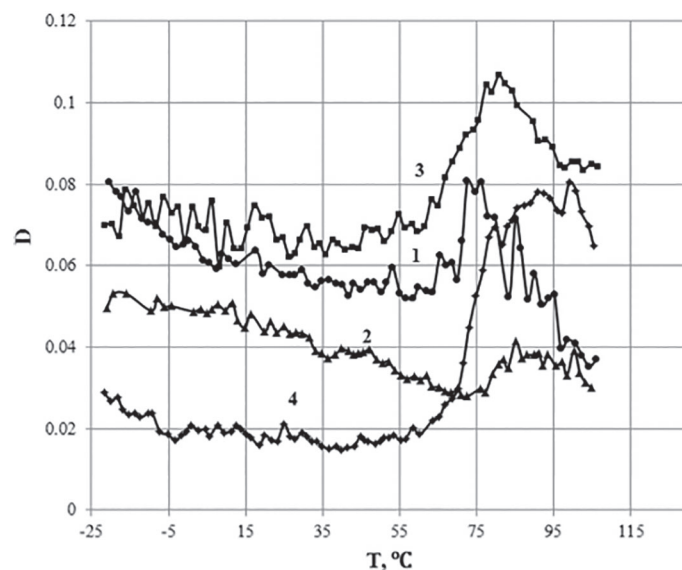


Рис. 10. Зависимость декремента затухания D от температуры для пленок: 1 – БОПЭТ, 2 – БОПЭТ-Э, 3 – BRAHNER, 4 – REMO.

Из рисунка видно, что в области температур от минус 20 до плюс 55 °C декремент затухания D пленок различается почти

в 4 раза. При приближении к температуре стеклования полимеров наблюдается резкий рост декремента затухания, что говорит о повышении подвижности сегментов макромолекул [16]. В указанном диапазоне температур пленки ведут себя относительно стабильно, изменение декремента затухания не превышает $\pm 0,01$. Это способствует сохранению стабильных акустических характеристик при применении пленок в качестве мембран барабанов. При повышении температуры происходят релаксационные переходы и декремент затухания резко возрастает, причем характер изменения для всех пленок различен.

Из данных рис. 10 были определены температуры релаксационных переходов испытанных образцов (табл. 5).

Таблица 5. Релаксационные параметры пленок БОПЭТ, определенные методом крутильных колебаний.

Наименование пленки	Диапазон температур стеклования, °C	Температура пика стеклования, °C	Время релаксации, $\tau_{\text{релакс}}$, с
БОПЭТ	67–83	74	0,11
БОПЭТ-Э	75–105	90	0,13
РЕМО	64–96	81	0,12
BRAHNER	62–96	80	0,13

Полученные данные указывают на различный характер изменения декремента затухания в широком интервале температур, что говорит о различном составе изученных пленок и вероятном наличии модифицирующих добавок. Известно, что при синтезе ПЭТ для улучшения деформируемости и снижения степени кристалличности полимера вводят небольшое количество изофталевой кислоты или используют различные сомомеры [3].

Времена релаксации напряжений во всех исследованных пленках составляют десятые доли секунды, а это значит, что в диапазоне рабочих температур от минус 20 до плюс 55°C свойства материалов будут стабильными.

Заключение

Результаты испытания образцов изученных пленок на растяжение показывают существенное снижение прочностных показателей после многократного изгиба. Поскольку при эксплуатации барабанных мембран происходит статистическое, а не направленное приложение нагрузки, то снижение механических показателей при воздействии ударных и изгибающих нагрузок будет существенно ниже, чем в выбранных при испытании условиях.

Данные по декременту затухания и временам релаксации материалов на основе БОПЭТ в широком температурном интервале дают основание предположить, что стабильность по амплитуде и скорости релаксационных процессов способствует стабильности акустических характеристик и долговечности мембран из данного материала.

Изучение характеристик комбинированного материала на основе ПА-6 при изгибе дает возможность сделать вывод о перспективности такого материала при использовании в акустических ударных инструментах.

Литература

1. Власов С.В., Марков А.В. Ориентационные явления в процессах переработки полимерных материалов. М.: МИТХТ. 2014. 137 с.
2. Alzoub K. M., Lu S., Sammakia B., Poliks M. Factor Effect Study for the High Cyclic Bending Fatigue of Thin Films on PET Substrate for Flexible Displays Applications // Journal of Display Technology. 2011. 7(6):348–355. DOI:10.1109/JDT.2010.2076772.
3. Производство упаковки из ПЭТ / редакторы Давид Брукс и Джефф Джайлз / пер. с англ. под ред. О.Ю. Сабая. СПб: Профессия, 2006. 368 с.
4. BoPET [Electronic resource] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/BoPET> (дата обращения 10.12.2024).
5. Грэлльманн В., Зейдлер С. Испытания пластмасс / пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. СПб: Профессия, 2010. 720 с.
6. Кто такой Ремо или почему мы называем «кожу» «пластиком» [Электронный ресурс] URL: https://slami.ru/articles/list/remo_history.html (дата обращения 10.12.2024).
7. Пластик – барабану «голова» [Электронный ресурс] URL: https://www.rock-and-roll.ru/article/plastik_barabanu_golova (дата обращения 10.05.2004).
8. G.P. Thomas. What Materials Are Used In Drum Kits? [Electronic resource] URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7889> (дата обращения 10.12.2024).
9. Drum [Electronic resource] URL: <http://www.madehow.com/Vol-ume-4/Drum.html> (дата обращения 10.12.2024).
10. Выбираем пластик для барабана. [Электронный ресурс] URL: <https://muzmart.com/article/plastic-dlya-barabana> (дата обращения 10.12.2024).
11. A. Torin, M. Newton. Collisions in Drum Membranes: a preliminary study on simplified system. [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/264696002_Collisions_in_Drum_Membranes_a_preliminary_study_on_a_simplified_system (дата обращения 10.12.2024).
12. Кузнецов Л.А. Акустика музыкальных инструментов: Справочник. М: Легпромиздат, 1989. 368 с.
13. Мембрана для ударных музыкальных инструментов. [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU286484A1_19701110 (дата обращения 16.12.2024).
14. Ломовской В.А. Устройство для исследования локальных диссипативных процессов в твердых материалах различной химической природы, строения и структуры // Научное приборостроение. М: ИАП РАН, 2019. Т. 29, №1, С. 44.
15. Roger L. Blaine Polymer Heats of Fusion [Электронный ресурс] URL: <https://pdf4pro.com/view/thermal-applications-note-polymer-heats-of-fusion-6ba146.html> (дата обращения 16.12.2024).
16. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров: учебное пособие. 3-е издание, исправл. СПб.: Лань, 2021. 368 с.